

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Vliv procesních parametrů laserového obrábění na kvalitu řezu

Influence of Process Parameters of Laser Machining to Cut
Quality

Student:

Bc. Jan Dostál

Vedoucí diplomové práce:

Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.

Ostrava 2012

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Dostál**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Vliv procesních parametrů laserového obrábění na kvalitu řezu**
Influence of Process Parameters of Laser Machining to Cut Quality

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky laserového řezání.
2. Využití laserového systému při obrábění.
3. Návrh experimentu.
4. Měření a vyhodnocení dat.
5. Technické zhodnocení.
6. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 2. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008, s. 150. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [3] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007, s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [4] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. Žilina : EDIS Žilina, 2007, s. 343. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [5] SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing.et Ing.Mgr. Jana Petruš, Ph.D.**


Konzultant diplomové práce: Ing. Martin Grepl

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012


doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 21.5.2012




podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21.5.2012


.....
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Jan Dostál

Adresa trvalého pobytu autora práce: Družby národů 28, Křelov-Břuchotín, 78336

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

DOSTÁL, J. *Vliv procesních parametrů laserového obrábění na kvalitu řezu: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012, 70 s. Vedoucí práce: Petrů, J.

Diplomová práce se zabývá metodou laserového dělení materiálu a vlivu procesních parametrů na výslednou kvalitu řezu. První část je zaměřena na obecné poznatky laserové technologie, principu a možného průmyslového využití laseru, především v oblasti řezání. V úvodu experimentální části je provedeno srovnání kvality řezání niklové slitiny INCONEL na pevnolátkovém Nd:YAG a plynovém typu laseru. Pomocí metalografického šetření došlo k vyhodnocení a stanovení procesních parametrů pro řezání na kontinuálním CO₂ laseru. Dosažené výsledky jsou v závěru práce důkladně zanalyzovány.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

DOSTÁL, J. *Influence of Process Parameters of Laser Machining to Cut Quality: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2012, 70 p. Thesis head : Petrů, J.

This thesis deals with the method of laser cutting of material and the influence of process parameters on the final quality of the cut. The first part focuses on general knowledge of laser technology principle and the possible industrial use of lasers, particularly in the cutting area. In the introduction experimental section is compare the quality cutting of nickel alloy INCONEL the solid state Nd: YAG and the gas type laser. Using metallographic investigation was to evaluate and determine process parameters for cutting the continuous CO₂ laser. The achieved results are in conclusion thesis thoroughly analyzed.

Obsah

Seznam použitých zkratek	8
Úvod.....	10
1. Úvod do problematiky laserového řezání	11
1.1 Historie laseru	11
1.2 Fyzikální princip činnosti laseru	12
1.3 Laser a jeho konstrukce	14
1.3.1 Obecný princip laseru	14
1.3.2 Hlavní části a konstrukce laseru	15
1.3.3 Charakteristika zařízení pro činnost laseru	15
1.4 Vlastnosti laserového záření	17
1.5 Rozdělení laseru.....	18
1.5.1 Pevnolátkové lasery	19
1.6 Vláknové lasery	21
1.7 Polovodičové lasery	21
1.8 Plynové lasery.....	22
1.8.1 Atomární lasery.....	23
1.8.2 Iontové lasery.....	23
1.8.3 Molekulární lasery	23
1.9 Plazmatické lasery	26
1.10 Kapalinové lasery	26
2. Využití laseru	27
2.1 Využití laseru pro technologické účely	27
2.1.1 Laserové řezání a vyřezávání.....	28
2.1.2 Vrtání laserem.....	31
2.1.3 Soustružení s podporou laseru	31

2.1.4 Laserové svařování	32
2.1.5 Povrchová úprava materiálu laserem	33
3. Experimentální část	34
3.1 Použitý laserový systém-Winbro Delta	34
3.1.1 Nd-YAG laser	35
3.1.2 CO ₂ laser	36
3.2 Materiál, tvar a rozměry zkušních vzorků	37
3.2.1 Materiál INCONEL 625	37
3.2.2 Tvar a rozměry zkušebních vzorků.....	37
3.3 Laserové řezání vzorků.....	39
3.3.1 Řezání vzorků na plynovém (CO ₂) a pevnolátkovém (Nd:YAG) laseru.....	39
3.3.2 Řezání pomocí plynového CO ₂ laseru	45
4. Vyhodnocení	49
4.1 Metalografické šetření	49
4.2 Vyhodnocení kvality řezu.....	50
4.3 Měření mikrotvrdosti	63
5. Diskuze experimentální části	64
5.1 Analýza dosažených výsledků.....	64
5.2 Závěrečná doporučení.....	66
6. Závěr	67
Seznam použité literatury	69

Seznam použitých zkratek

Al₂O₃	oxid hlinitý	[-]
AO	aktivní oblast	[-]
Ar⁺	kationt argonu	[-]
CO	oxid uhelnatý	[-]
CO₂	oxid uhličitý	[-]
Cr³⁺	kationt chromitý	[-]
E	energetická hladina	[J]
Er:YAG	yttrium-aluminium-granát dopovaný erbiem	[-]
H	Planckova konstanta	[J.s]
I	elektrický proud	[A]
Kr²⁺	iont kryptonu	[-]
KZ	koherentní záření	[-]
K_{1,2}	kontakty	[-]
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesilování světla pomocí stimulované emise záření)	[-]
L	vzdálenost mezi zrcadly	[mm]
LM	Laser Machining (Laserové obrábění)	[-]
LAM	Laser Assited Machining (Laserem podporované obrábění)	[-]
MASER	Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesilování mikrovln pomocí stimulované emise záření)	[-]
N	polovodič s vodivostí N	[-]
Nd₂O₃	neodymium	[-]
Ne²⁺	iont neonu	[-]
Nd:YAG	yttrium-aluminium-granátu, dopovaný neodymiem	[-]
Nd:YLF	lithium-yttrium-fluorid dopovaný neodymiem	[-]

P	polovodič s vodivostí P..... [-]
SiC	karbid křemiku [-]
TEM	Transverse Electromagnetic Mode (příčné elektromagnetické pole ... [-]
T	termodynamická teplota [K]
Xe²⁺	iont xenonu..... [-]
Y₃Al₅O₁₂	Yttrium Aluminium Granát [-]
ZR_{1,2}	rovinné čelní plochy s opticky lesklým povrchem [-]
λ	vlnová délka..... [μm]
ν	frekvence kvantového přechodu [s ⁻¹]

Úvod

V posledních letech se stal laser nedílnou součástí našeho života, a to především díky jeho všestrannému použití v mnoha oborech lidských činností. Laserové technologie se neustále rozvíjí a nachází uplatnění např. v lékařství, spektrometrii, optické technologii záznamových médií, měřicí technologii atd. Ve strojírenském průmyslu je laser důležitý a velmi populární ve vztahu k obrábění. Pro svou vysokou přesnost, výkonnost a obrábění nejrůznějších materiálů představuje velmi vhodnou alternativu vůči konvenčnímu obrábění.

V této práci bude zpracována problematika laserového řezání ve spolupráci s nadnárodní firmou Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. se sídlem v Hlubočkách – Mariánském Údolí u Olomouce. Firma se zabývá se výrobou a opravou plechových a žáruvzdorných dílů leteckých turbínových motorů z nerezavějících ocelí a speciálních slitin (hliníkových, niklových, kobaltových a titanových), které se nachází v mnoha dopravních letadlech typu Boeing a Airbus. Vzhledem ke specifikaci dílů je laserové řezání ve firmě Honeywell jednou z nejvíce využívané technologie.

Na základě požadavků firmy Honeywell se experimentální část bude zabývat problematikou omezení nežádoucích otřepů při řezání slitiny laserem. Otřepy jsou jedním z nejdůležitějších kritérií pro vyhodnocování kvality řezu. Čím menší je výskyt otřepů, tím dále odpadají další dodatečné operace pro jejich odstranění.

První část experimentu bude zaměřena srovnání kvality řezu při řezání na pevnolátkovém Nd:YAG laseru a plynovém CO₂ laseru. V další části bude provedeno vyhodnocení kvality řezu a stanovení takových procesních parametrů, které částečně povedou k vyřešení stěžejního problému, zadaného firmou Honeywell.

1. Úvod do problematiky laserového řezání

1.1 Historie laseru

Slovo LASER vychází z počátečních písmen anglického názvu Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což můžeme přeložit jako zesílení světla pomocí vynucené (stimulované) emise záření.

Vývoj laseru začíná rokem 1917 Albertem Einsteinem, který kromě jevu spontánní emise (samovolná emise) a absorpce (atom v nižším energetickém stavu a přejde do vyššího stavu), poukazuje na možnost existence dalšího jevu a to emisi stimulovanou (foton dopadá na atom ve vyšším energetickém stavu E_2 a přiměje ho k přechodu do nižšího stavu E_1 za vyzáření dalšího fotonu, přitom se původní foton nepohlí a oba se pohybují společně dále stejným směrem). [1], [2]

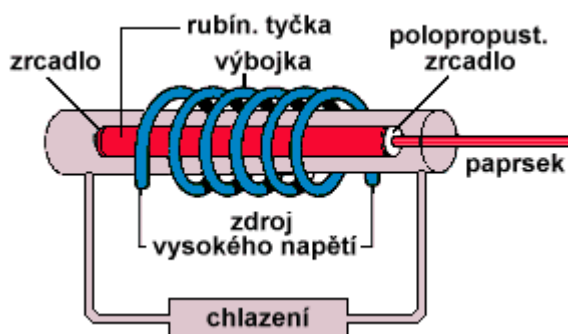
Další důležitý krok ve vynálezu udělal v roce 1939 ruský fyzik V.A.Fabrikant, který poukázal na možnost využití stimulované emise k zesílení elektromagnetického záření procházejícího prostředím. V roce 1951 získali ruští fyzici V.A. Fabrikant, M.M. Vudynský a F. A. Butajevová patent na metodu zesilování elektromagnetického záření. Díky tomu se objevil první předchůdce laseru s označením MASER, sestavený roku 1953 Chalesem Townesem, J.O. Gordonem a H.J Zeigerem. Tento kvantový generátor pracoval způsobem zesilování mikrovln stimulovanou emisí záření. Realizace MASERu dala vznik novému vědnímu oboru, který byl pojmenován kvantová elektronika. Nobelovu cenu za fyziku obdrželi v roce 1964 vědci C. H. Townes, N. Basov a A. Prochodiv za zásadní výzkum v oboru kvantové elektroniky. [1], [4]

V roce 1958 A.M. Prochorov, A. Schawlow a C. Townes vyslovili nezávisle na sobě myšlenku, že jev stimulované emise použitý v maseru, může být použit i v infračervené a optické oblasti spektra. Nejblíže k sestavení laseru měl Theodore Maiman. Musel však nejprve vyřešit tři základní technické otázky:

- jaké použít aktivní prostředí, v němž by docházelo ke stimulované emisi?
- jak zajistit, aby atomy aktivního prostředí přešly na vyšší energetickou hladinu (excitace, buzení atomů)?
- jak zajistit, aby v aktivním prostředí docházelo ke stimulované emisi záření?

Uvedené problémy úspěšně vyřešil a tím sestavil první funkční LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Prototyp laseru byl sice velmi

primitivní, ale i dnešní nejmodernější a nejvýkonnější lasery vycházejí z jeho sestavy. Jako aktivní prostředí byl vybrán krystal syntetického rubínu. Buzení atomů na vyšší energetickou hladinu se provádělo krátkými světelnými záblesky výbojky. K zesílení světla stimulovanou emisí docházelo mezi dvěma rovnoběžnými zrcadly. [3]



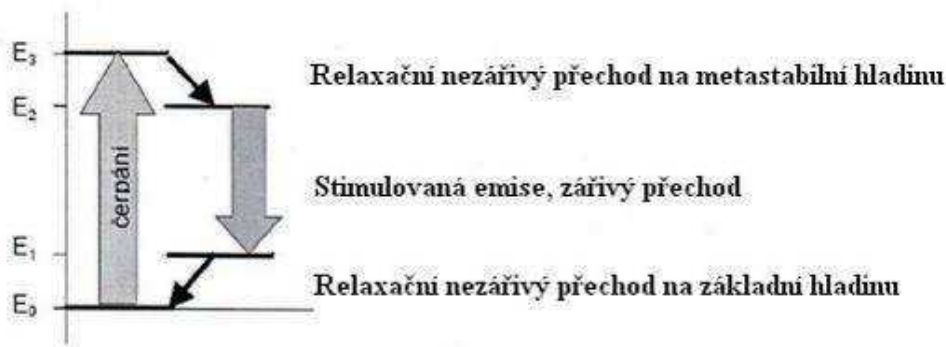
Obr.1. Schéma prvního rubínového laseru [3]

Krátce po prvním rubínovém laseru začaly vznikat další a další typy. Za 50 let od prvního záblesku rubínového laseru bylo vyvinuto a zkonstruováno nespočet druhů laserů, lišící se nejen aktivním prostředím, ale i způsobem buzení, výkonem a dalšími vlastnostmi a parametry. Významným objevem v oblasti polovodičových laserů jsou vláknové lasery. Mezi výhody patří velká účinnost, vzduchové chlazení, malé rozměry, vysoká kvalita paprsku a dlouhá životnost. Budoucnost jasně hovoří pro vláknové lasery, i když tyto lasery nenahradí všechny aplikace.

1.2 Fyzikální princip činnosti laseru

Laserový paprsek je elektromagnetické vlnění lišící se od jiných druhů záření pouze vlnovou délkou. Běžné světelné záření je vlnění, které se šíří všemi směry. Vznik světla objasňuje kvantová fyzika. Laserové světlo vzniká v prostředí určitého stimulovaného záření potlačením spontánní (samovolné) emise na úkor stimulované (vynucené). Atomy se mohou vyskytovat jen v určitých energetických stavech a na určitých energetických hladinách. Energetické hladiny (dále E) charakterizují hodnotu energie vázaných soustav ve stacionárních stavech, (Obr.2). V základním stavu E_0 má atom nejnížší energii. Ostatní stavy nazýváme excitované neboli vybuzené. Takových stavů dosáhneme, jestliže atomu dodáme dostatečnou energii, aby přešel z nižší energetické hladiny na vyšší. Jde tedy o vybuzení aktivního prostředí v rezonanční dutině pomocí záření. Aktivní prostředí může být tvořeno pevnou látkou, kapalinou nebo plynem.

Podle způsobu čerpání, relaxace a stimulované emise poznáme různé systémy, které jsou dané druhem použitého aktivního prostředí (aktivní látka v kvantových zesilovačích). Mohou být dvoj-, troj-, čtyř- a více hladinové systémy. V dnešní době jsou nejpoužívanější a nejvýhodnější vícehladinové lasery, obsahující tzv. metastabilní stavy, zaručující delší setrvání atomu v excitovaném stavu (10^{-8} až 10^{-3} sekund). V praxi se používají právě čtyřhladinové systémy, zejména proto, že jsou schopny vytvářet kontinuální záření a samotná excitace atomů do vyšších hladin není energeticky tak náročná. [5]



Obr.2. *Přechod mezi energetickými hladinami* [5]

Energie mezi jednotlivými energetickými hladinami je rovna hodnotě energie fotonu. Při srážce fotonu s atomem předá foton celou svou energii atomu, ten energii absorbuje a přejde do vyšší energetické hladiny. Při samovolném přechodu zpět na nižší energetickou hladinu atom vyzáří foton energií, kterou může molekula nebo atom přijmout jen v určitých dávkách, rovné rozdílu energií mezi energetickými hladinami. Vyjadřuje to Bohrovův vztah: [5]

$$\Delta E = h \cdot \nu \quad (1)$$

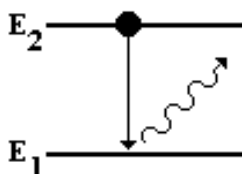
kde:

E...energetický rozdíl mezi hladinami [J],

h... Planckova konstanta $6,626 \cdot 10^{-34}$ [J.s],

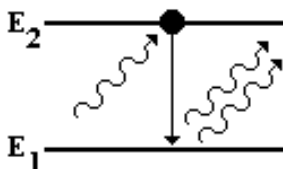
ν ... frekvence kvantového přechodu [s^{-1}].

Jak bylo již zmíněno, atomy se energeticky excitují, ale na vyšší hladině nejsou schopny zůstat dlouho. Proto se po krátké době vrací na nižší energetickou hladinu se současným vyzářením fotonu. O tomto jevu mluvíme jako **spontánní emisi**, (Obr.3).



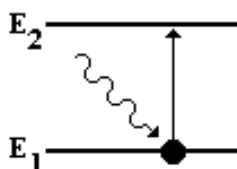
Obr.3. Spontánní emise [2]

Pokud dojde ke srážce fotonu s excitovaným atomem, pak jde o **stimulovanou emisi**. Dochází tedy k jevu, který předpověděl A.Einstein, první foton se neabsorbuje a vytvoří se dva naprosto stejné fotony, které jsou schopny dále excitovat atomy. Stimulovaný foton má stejné vlastnosti (energii, směr a fázi) jako foton stimulující, jedná se tedy o záření koherentní.



Obr.4. Stimulovaná emise [2]

K tomu, aby došlo ke zvýšení počtu atomů v některé z vyšších energetických hladin, je potřebné vnější působení, které se nazývá čerpání. Čerpáním laseru rozumíme působení energie k rozrušení rovnovážného stavu v systému (vybuzení na vyšší energetickou hladinu). Vybuzení se může dosáhnout absorpcí (zánik fotonu a následný přechod z nižší energetické hladiny na vyšší). Schematické znázornění absorpce je na (Obr.5).



Obr.5. Absorpce [2]

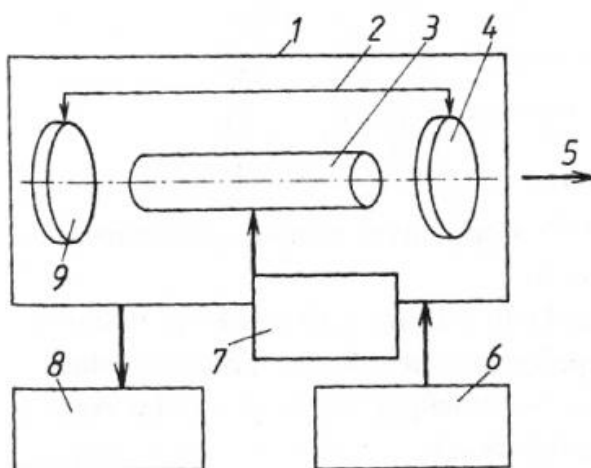
1.3 Laser a jeho konstrukce

1.3.1 Obecný princip laseru

Princip laseru můžeme popsat následovně. Zdroj budící energie zajišťuje, aby se v aktivním prostředí nacházel dostatek kvantových soustav v excitovaném stavu. Poté, co některá kvantová soustava aktivního prostředí přejde spontánní emisí na nižší energetickou hladinu, bude uvolněné kvantum stimulovat i další kvantové soustavy k přechodu na spodní energetickou hladinu. Část fotonů se může kvantovými soustavami

opět absorbovat, pokud však bude v aktivním prostředí více kvantových soustav v excitovaném stavu, bude se optické záření řetězovou reakcí zesilovat. Aby se zajistil směr laserového záření, formuje se aktivní prostředí do tvaru válce a je umístěno uvnitř optického rezonátoru. Optický rezonátor zajišťuje selektivní zpětnou vazbu, to znamená, že rezonující fotony mohou zesilovat. Velikost lze nastavit podle požadovaných vlastností laseru. Až po dostatečném zesílení je laserový svazek z rezonátoru vyveden. [9]

1.3.2 Hlavní části a konstrukce laseru



Obr.6. Hlavní části laseru [8]

1-laserová hlavice, 2-rezonátor, 3-aktivní prostředí, 4-polopropustné zrcadlo, 5-výstupní zařízení (laserový paprsek), 6-zdroj energie buzení, 7-budící zařízení, 8-chladicí systém, 9-nepropustné zrcadlo

1.3.3 Charakteristika zařízení pro činnost laseru

Aktivní prostředí je látka obsahující oddělené energetické hladiny elektronů. Jedná se o prostředí, které je nasyceno atomy, ionty a molekulami na vyšších energetických hladinách. Pokud je laserové médium dostatečně nasyceno, zvyšuje se množství iontů a molekul na vyšší energetické hladině. Následkem toho vzniká tzv. inverze populace tj. zvýšení množství atomů a molekul na vyšších energetických hladinách, dále také schopnost laseru zesilovat nebo generovat koherentní záření. [12]

Může být plynné (jeden nebo více plynů), pevnolátkové (prostředí je tvořeno krystalem), kapalinové (roztoky organických barviv). [8]

Rezonátor je optický systém, umožňující zformovat a zesílit záření, tj. vycházející elektromagnetickou vln. Konstrukční uspořádání rezonátoru určuje vlastnosti paprsku

(koherenci, intenzitu záření, jeho pravidelnost, spektrální a prostorové charakteristiky). Optický rezonátor tvoří dvě rovnoběžná zrcadla. Jedno z nich je nepropustné (dialektrické zrcadlo) a druhé je polopropustné. Polopropustné zrcadlo propouští fotony ven, až při větší intenzitě, jinak udržuje fotony dále v aktivním prostředí. Existují lasery, které dokážou vyvinout dostatečně velkou energii při jednom průchodu aktivním prostředím, nepotřebují tedy rezonátor. Pracují tzv. "superradiálně" - dokážou získat dostatečnou energii jedním průchodem. Mezi ně patří např. měděný laser nebo dusíkový laser. Nejrozšířenějším a nejpoužívanějším je rovinný rezonátor s paralelními zrcadly.

Správná funkce rezonátoru je podmíněna tím, že uvnitř vzniká stojaté vlnění. Důležitá je také vzdálenost zrcadel (L), která závisí na vznikajícím záření podle vztahu: [6], [7], [8]

$$L = n \cdot \lambda \quad (2)$$

kde:

L ...vzdálenost zrcadel [mm],

n ...přirozené číslo [-],

λ ...vlnová délka [mm].

Budící zařízení zjišťuje energii pro dostatek kvantových soustav v excitovaném stavu. Způsob buzení záleží na druhu aktivního prostředí. Plynné médium je téměř vždy buzeno elektrickým výbojem. Můžeme využít i chemickou reakci, rychlou expanzi plynu nebo optického buzení. Pevné laserové médium je buzeno lampami-výbojkami. Budící zařízení může pracovat v režimu kontinuálním nebo pulsním.

Pro co nejlepší využití energie budícího záření je nutné zajistit, aby se elektrony ihned po vyzáření fotonů vracely v největším počtu kvantových soustav na hladinu, z níž mohou být opět excitovány. U některých druhů laserů (podle druhu aktivního prostředí) je zaplňování základní hladiny rychlé jen při velmi nízké teplotě. Při vyšších teplotách silně roste požadavek na velikost budícího zdroje a klesá výkon výstupního zařízení. [7]

Chladicí systém má za úkol odvést nevyužitou energii, která se nepřemění v záření, ale v tepelnou energii. Pokud by aktivní prostředí nebylo dostatečně chlazeno, může dojít k přerušení generace záření. Chladicím médiem je nejčastěji voda. Chlazení je koncipováno dvojím způsobem: [7]

1. Chladicí médium protéká celou budící dutinou.
2. Laserový krystal a výbojky jsou umístěny ve skleněných trubicích a voda protéká těmito trubicemi. Voda je speciálně upravená - deionizovaná.

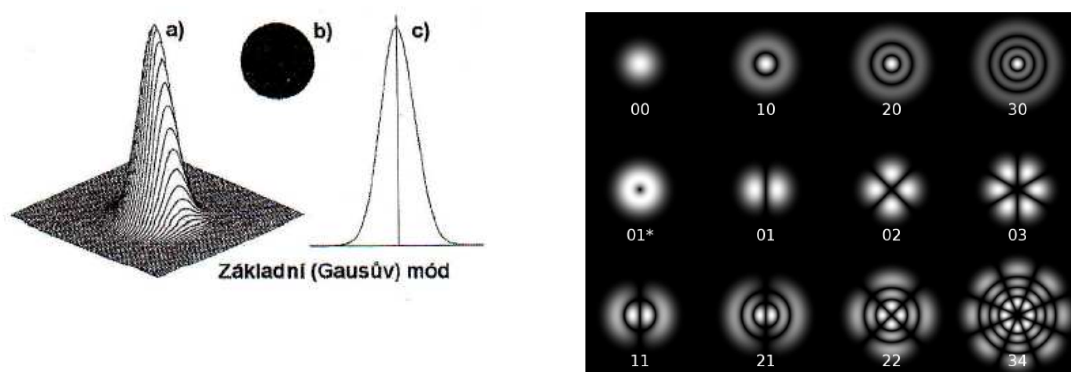
1.4 Vlastnosti laserového záření

Unikátnost laserového záření oproti elektromagnetickému záření je v jeho specifických vlastnostech. Mezi nejdůležitější patří monochromaticnost, koherentnost, směrovost a módová struktura. [4]

Monochromaticnost vyplývá z jevu stimulované emise. Paprsek je v ideálním případě tvořen fotony o stejné vlnové délce. Generátory v praxi splňují tuto podmínky s minimálními odchylkami. [4]

Důležitou vlastností laserového paprsku je jeho **směrovost**. Charakterizujeme ji prostorovým úhlem a je podmíněna tím, že vystupující záření na povrchu polopropustného zrcadla je koherentní (sfázované) na ploše, která je větší než vlnová délka záření. Obecně je směrovost v praxi charakterizována rovinným úhlem divergence. Divergence je popsána jako závislost vlnové délky a výstupního průměru paprsku. [4]

V optickém rezonátoru může existovat elektromagnetické pole rozdělující amplitudu a fázi vlnění vznikající právě v rezonátoru. Takové částečné rozdělení pole ovlivňuje transverzální elektromagnetický mód (TEM) pasivního rezonátoru. Příčný mód může být definován v kartézských souřadnicích (TEM_{mn}). Indexy „**m**, **n**“ vyjadřují počet nulových hodnot intenzity průřezu paprsku ve svislém a horizontálním směru. Pokud jsou módy kruhově symetrické (TEM_{pl}), používají se indexy „**p**, **l**“ v radiálním a horizontálním směru. Nejnižší možný je TEM_{00} . Tento mód má Gaussovo rozložení maximální intenzity v ose. V technické praxi pracuje většina laserů s módem TEM_{00} . [4], [9], [10]



Obr.7. Modální struktura laseru-různé módy laseru

Laserový paprsek je **koherentní**. To znamená, že vlnění má stejnou frekvenci a fázi (vlnění šířící se vedle sebe nemá žádnou rozbíhavost). Tato vlastnost se používá např. při tvorbě hologramu nebo také laserové záření lze soustředit do bodu o průměru řádově několika setin milimetru. [9]

Vlnová délka určuje, v jaké oblasti rozhraní spektra se bude laserový paprsek pohybovat. Vlnové délky laserového paprsku odpovídají rentgenovým paprskům až po mikrovlnnou oblast. Hodnota se udává v nanonemtrech. [9]

1.5 Rozdělení laseru

Od sestrojení prvního generátoru stimulovaného záření až do současnosti došlo k obrovskému vývoji. Odstraněním nedostatků, které bránily většímu průmyslovému využití, přinesl vývoj velké množství různých typů laserů s odlišnými vlastnostmi, předurčující praktické využití. Neexistuje univerzální laser, který by vyhověl všem podmínkám. Laserů je velké množství a každý něčím vyniká a je vhodný k určitému použití. Lasery mohou být klasifikovány podle uvedených hledisek: [1], [8]

- ***Podle aktivního prostředí (skupenství materiálu pro generování záření):***

- pevnolátkové
- polovodičové
- plynové
- kapalinové
- plazmatické

- ***Podle vlnové délky optického záření:***

- infračervené
- viditelného pásma
- ultrafialové
- rentgenové

- ***Podle typu kvantových přechodů:***

- molekulární (rotační, rotačně-vibrační, vibrační)
- elektronové
- jaderné

- **Podle typu buzení:**
 - optické
 - buzení elektrickým výbojem
 - buzení elektronovým svazkem
 - buzení chemicky
 - rekombinací
- **Podle časového režimu provozu laseru:**
 - impulzivní
 - kontinuální (spojité, nepřetržité)
- **Podle délky generovaného pulzu:**
 - s dlouhými pulzy
 - s krátkými pulzy
 - s velmi krátkými pulzy (piko, nanosekundové)
- **Podle dosahovaného výkonu:**
 - nízkovýkonové (desítky až stovky W)
 - vysokovýkonné (rozmezí 1-30 kW)
- **Podle oblasti použití:**
 - technologické
 - energetické
 - vojenské
 - lékařské
 - výzkumné
 - měřicí

1.5.1 Pevnolátkové lasery

Pro pevnolátkové lasery se jako aktivní látka používá monokrystalické nebo amorfni látky s přísadami aktivačních prvků. Aktivní látka-matrice je základním materiálem, který určuje většinu technických vlastností daného krystalu. Mezi materiály, které se používají, patří: [1]

1. **Krystaly** (oxidy, granáty, alumináty, fluoridy, oxysulfidy, fosfáty a silikáty)
2. **Skla** (výhoda: výborná optická kvalita, nevýhoda: menší tvrdost a tepelná vodivost)
3. **Keramika** (výhodou je nízká cena)

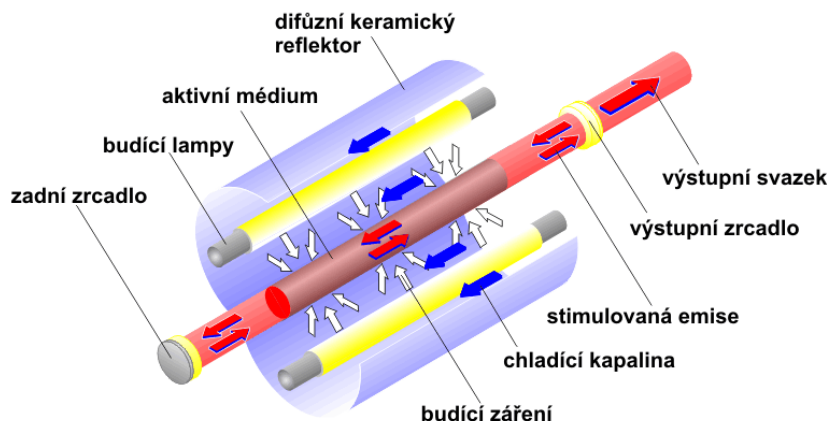
Většina pevnolátkových laserů pracuje v pulzním režimu a jako čerpací zdroj se používají plynové výbojky nebo diody.

Druhy pevnolátkových laserů:

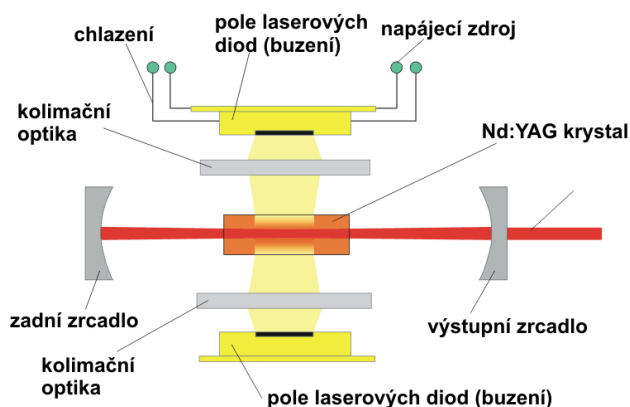
- *Rubínový laser* (aktivním prostředím je Al_2O_3 + aktivátory Cr^{3+})
- *Neodymový laser* (matricí je sklo dopované Nd_2O_3)
- *Nd:YLF laser* (matricí je lithium-yttrium-fluorid)
- *Er:YAG laser* (materiál matrice pro Er iont tvoří yttrium-aluminium-granát)
- *Nd:YAG laser*

V dnešní době nejpoužívanější druh pevnolátkového laseru. Aktivním materiálem je zde izotropní krystal yttrium aluminium granát ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$), dopovaný neodmymiem (Nd^{3+}). Krystal se skládá z velmi stabilní látky, která vyniká vysokou hustotou energie a akumulací schopností pro generování krátkých vysokovýkonných pulsů. Tepelná vodivost granátu dovoluje chlazení aktivního materiálu, a proto můžeme použít provoz jak v impulsivním, tak i v kontinuálním režimu. V dnešní době kontinuální Nd:YAG lasery již žádná větší laserová firma nevyrábí, důvodem je nahrazení účinnějšími vláknovými lasery.

K optické nabuzení dochází pomocí kryptonových zábleskových lamp (Obr.8) nebo diodami, (Obr.9). Laser Nd:YAG generuje neviditelné infračervené záření (s pomocí optiky generuje zelené světlo) na vlnové délce 1064 nm (nanometrů). Lampami buzené lasery mají stále své nezastupitelné místo v mnoha průmyslových aplikacích, a to hlavně díky energii v pulzu. Další výhodou pevnolátkových laserů oproti jiným typům je v jednodušší konstrukci, stabilitě a v malých nárocích na údržbu. [1]



Obr.8. Buzení Nd:YAG laseru kryptonovými zábleskovými lampami [11]



Obr.9. Buzení Nd:YAG laseru pomocí diod [11]

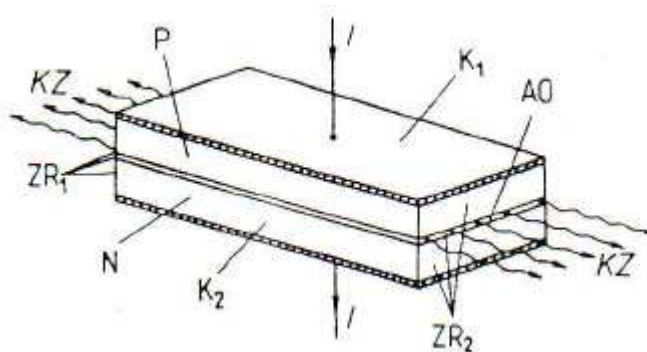
1.6 Vlákňové lasery

Vlákňové lasery představují unikátní typ laseru, ve kterém generace záření probíhá uvnitř optického vlákna dopovaného vzácnými zeminami (erbium-Er, ytterbium-Yr). Předností takto buzených laserů je ve výborné kvalitě svazku, nízkém příkonu, kompaktnosti a nepotřebují žádné optomechanické prvky (čočky, zrcadla, děliče svazku) pro navázání výstupu do vlákna. Již dnes výkony dosahují až 40 kW, jde o nejmodernější technologii pro průmyslové řezání, svařování a značení. [8]

1.7 Polovodičové lasery

Polovodičové lasery jsou dnes nejrozšířenější lasery. V praxi se vyskytují pod označením laserová dioda. Od ostatních druhů laserů se liší tím, že nepracují s přechodem elektronů mezi energetickými hladinami. Proces probíhá mezi dovolenými energetickými pásy (Obr.10). Aktivním prostředím je polovodičový materiál, ve kterém jsou aktivními

částicemi nerovnovážné elektrony. Jako laserové médium se používá galium arsenid (GaAs), kadmium sulfid (CdS) a kadmium selen (CdSe). Buzení je realizováno fotony, svazkem elektronů nebo elektrickým polem. Rezonátor je tvořen vybroušenými stranami polovodičového materiálu. Hlavní předností polovodičových laserů je jejich kompaktnost, velká účinnost (50%), provoz jak v kontinuálním tak i v pulsním režimu, mohou dosahovat vysokých výstupních výkonů. Uplatnění nachází lasery především v telekomunikacích a ve výpočetní technice.



Obr.10. Schematické uspořádání polovodiče laseru [1]

N-polovodič s vodivostí N; **P**-polovodič s vodivostí P; **K_{1,2}**-kontakty; **I**- protékající proud; **AO**-aktivní oblast; **KZ**-koherentní záření, **ZR_{1,2}**-rovinné čelní plochy s opticky lesklým povrchem

1.8 Plynové lasery

Tento druh laserů tvoří významnou skupinu, která má velmi širokou oblast uplatnění. Aktivní prostředí tvoří plynná fáze. Inverze populace hladin je vytvářena mezi energetickými hladinami ze složek plynu, tj. atomů (atomární lasery), iontů (iontové lasery) nebo molekul (molekulární lasery). Většina plynových laserů pracuje v kontinuálním režimu, ale byly vyvinuty i lasery s mimořádně vysokým výkonem pracující v impulsním provozu. Různorodost inverze populace mezi energetickými hladinami se odráží v širokém spektru vlnových délek.

Nejčastější buzení plynových laserů probíhá pomocí elektrického výboje ve zředěném plynu. Mezi další možnosti patří buzení chemickou reakcí, fotodisociací, rychlou expanzí horkého plynu, elektronovým svazkem nebo opticky (málo používané).

Výhodou plynových laserů je jejich účinnost pohybující se v desítkách procent. Další výhodou je při průchodu aktivním prostředím, optický svazek je minimálně poškozen.

Je méně deformován než u laserů s kondenzovaným prostředím, neboť plyny jsou obecně homogennější. Nevýhodou plynových laserů je malý výkon, který lze získat z jednotky objemu aktivního prostředí. Z této skutečnosti jsou výkonné lasery konstrukčně velmi rozměrné. [9], [12]

1.8.1 Atomární lasery

Aktivním prostředím jsou elektricky neutrální atomy. Typickým představitelem atomárních laserů jsou helium-neonový laser, dále měděný laser a jodový laser. [12]

1.8.2 Iontové lasery

Aktivní prostředím iontových laserů jsou ionty vzácných prvků nebo ionty par kovů. Ionty vzácných prvků bývají dvojmocné (např. Ne^{2+} , Ar^{2+} , Kr^{2+} , Xe^{2+}). Typickým představitelem je argonový laser. [12]

1.8.3 Molekulární lasery

Molekuly mají ve srovnání s atomy a ionty poměrně složitá spektra energetických hladin. V molekulách je možné vytvářet inverzi populace mezi energetickými hladinami různých typu. Inverze mezi dvěma elektronickými stavy umožňuje generovat ultrafialové nebo viditelné záření. Molekulární lasery jsou v současnosti považované za nejperspektivnější typy laserů. Příkladem laserů tohoto typu je vodíkový a dusíkový laser, oba typy generují ultrafialové záření. Nejvýkonnějšími plynovými lasery se staly s oxidem uhličitým (CO_2 laser). Velmi významným druhem laserů, především pro strojařské účely, je excimerový laser. [8], [12]

Excimerový laser

Aktivní prostředí je tvořeno excimery, tj. nestabilními molekulami, které vznikají na přechodnou dobu v důsledku vzájemného působení vybuzeného atomu s atomem v základním stavu. Dosud známé excimerové lasery pracují se vzácnými plyny. Buzení excimerových laserů se provádí elektrickým výbojem, nebo svazkem rychlých elektronů. Buzením elektronovým svazkem dosahujeme vyšší účinnosti než buzením elektrickým výbojem (až 10 krát). Používají se v selektivní laserové fotochemii při technologických aplikacích, např. při popisování součástí, vrtání, v medicíně a ve fyzikálním nebo biologickém výzkumu. [8], [12]

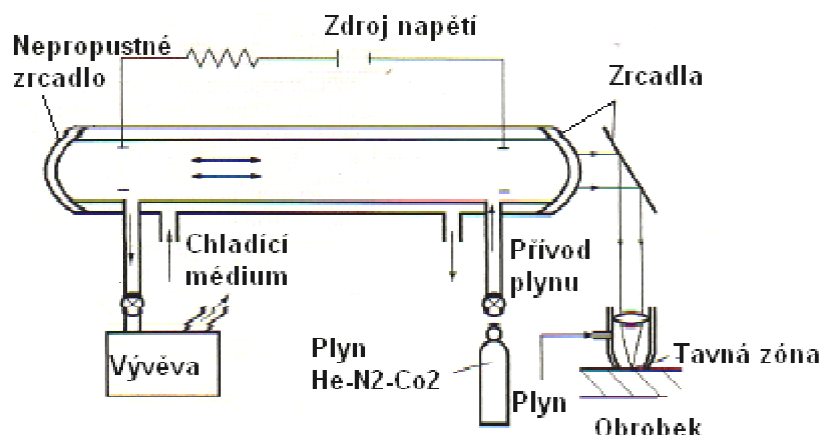
CO₂ laser

CO₂ laser patří mezi molekulární lasery. Hlavní předností je poměrně velká účinnost (10-20 %) a velký kontinuální výkon (desítky kW). Tyto vlastnosti vychází z využití kvantovo-energetických přechodů mezi různými vibračně-rotacími podhladinami základního elektronického stavu molekuly. Aktivními molekulami jsou molekuly oxidu uhličitého, které velmi rychle a účelně mění vibrační energii molekul.

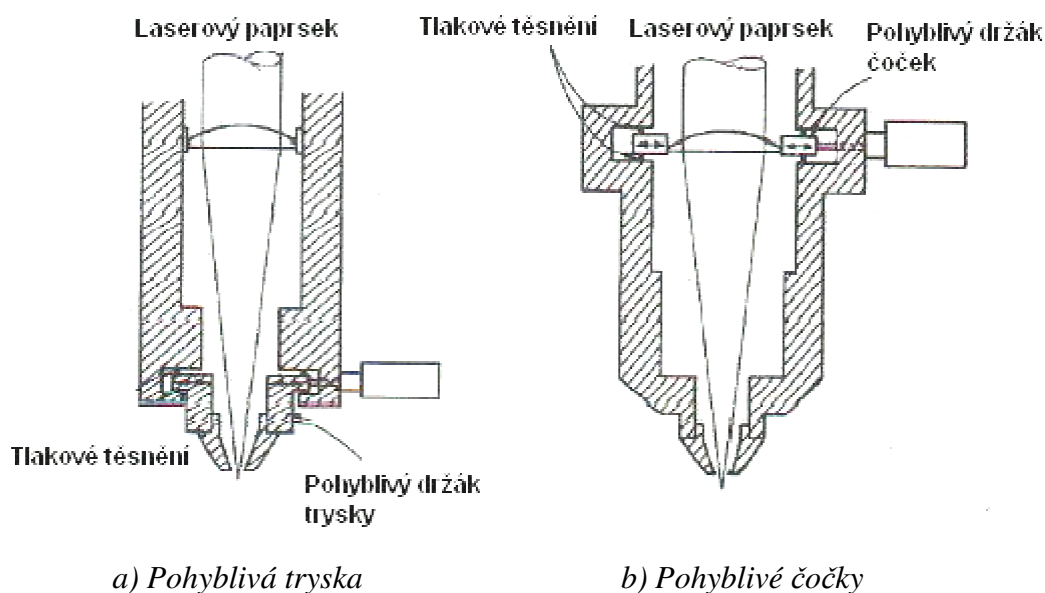
Při svoji činnosti využívá laser vibračně-rotací přechody molekul. Molekuly přechází ze svých asymetrických vibrací na symetrické vibrace přeskokem z vyšší energetické hladiny na nižší. V doutnavém elektrickém výboji jsou molekuly dusíku N₂ srážkami s elektrony excitovány ze svého základního energetického stavu na určitou energetickou hladinu, která se blíží energii asymetrických vibrací molekul oxidu uhličitého. Proto se může nepružnými srážkami velmi rychle a účelně měnit vibrační energie molekul. Tento jev je doprovázený vyzářením kvanta energie s vlnovou délkou 10,6 μm. Buzení (excitace) může být zajištěno radio-frekvenčně nebo elektrickým výbojem. Důležitou částí CO₂ laseru je vývojová trubice naplněná směsí plynů. Skládá se zejména z hélia k zabezpečení rozptylu tepla. Další používaný plyn je dusík, který ve výboji vytváří energii k nabuzení. Potřebný nízký tlak v trubici je udržován vývěvou. Po průchodu trubicí může být použitý plyn vedený na regeneraci a poté se může znovu použít v okruhu. [4], [12]

Energie potřebná na excitaci je vytvářena mezi elektrodami, připojené k napájení z generátoru. Vzniklé teplo je ze systému odváděno chladícím médiem (nejčastěji vodou). Chlazení musí být velmi účinné, aby teplota v dutině nepřekročila 400 K.

Generovaný paprsek vystupuje z rezonátoru polopropustným zrcadlem a do laserové hlavičky je přiveden systémem synchronizovaných zrcadel (Obr.11). Na rozdíl od laserů s vlnovou délkou cca 1 μm, nelze záření CO₂ laseru (10,6 μm) vést optickým vláknem a je nutné pro vedení svazku použít zrcadla, což je velká nevýhoda – optická dráha je složitější, vzniká nutnost její pravidelné kalibrace a jsou zde nároky na čistotu a údržbu zrcadel atd. [4], [12], [13]

Obr.11. Konstrukce CO₂ laseru [13]

Při použití laseru k řezání materiálu se používá laserová hlavička, která má za úkol přivádět pomocný plyn do místa řezu. Pomocný plyn, který kromě toho, že chrání optiku, vytváří také v místě dopadu laserového paprsku na materiál ochrannou nebo naopak agresivní atmosféru. Hlavním úkolem pomocného plynu je odstranění vznikající taveniny nebo páry, čímž přispívá k čistějšímu a rychlejšímu průběhu opracování materiálu. Existují různé typy laserových hlavic. Konstrukce je ovlivněna uložením trysky na přívod pomocného plynu (Obr.12).



Obr.12. Základní konstrukce laserových hlavic [13]

Dalším využitím CO₂ laserů v průmyslu je pro značení, gravírování a řezání nekovů (plasty, kůže, papír, skla, apod.), kdy nelze použít výše uvedené lasery s vlnovou délkou 10 μm. Zde se používají výkony do 1,5 kW.

CO laser

Pomocí podobných vibračně-rotčních přechodů jako CO₂ laseru pracuje i CO laser. Aktivním prostředím jsou v tomto případě molekuly oxidu uhelnatého. CO lasery vyzařují infračervené záření v pásmu 5 až 6,5 μm a vyznačují se dobrou účinností a velkými výstupními výkony. Buzení se provádí obdobnými metodami jako u CO₂ laseru a to především elektrickým výbojem nebo elektronovým svazkem. V CO laserech, kde nejsou kladeny žádné nároky na spektrální čistotu výstupního svazku, se dosahuje účinnosti až 50 %. Nevýhodou je jedovatost oxidu uhelnatého, proto není jejich uplatnění tak široké. [12]

1.9 Plazmatické lasery

Inverze populace je u plazmatického laseru vytvářena uvnitř chladnoucího plazmatu. U těchto laserů se používají ionty argonu s vlnovou délkou 747 nm, ionty kadmia s vlnovou délkou 537,8 nm a ionty rtuti s vlnovou délkou 567 nm. Aktivní prostředí vytvořené mnohonásobně nabitými ionty vedou k vytvoření rentgenového laseru. U rentgenových laserů jsou ještě mnohé konstrukční problémy. Jedním z těchto problémů je, že potřebná zrcadla s vysokou odrazivostí v oblasti vlnových délek 10 nm prakticky neexistují. Jediným možným řešením je konstrukce laseru s dlouhým aktivním prostředím a vysokým součinitelem zesílení tak, aby výstupní záření bylo v podstatě zesílenou spontánní emisí ve směru osy aktivního prostředí. [1]

1.10 Kapalinové lasery

U kapalinových laserů se jako aktivní prostředí používá buzené roztoky různých organických barviv nebo speciálně připravované kapaliny dopované ionty vzácných zemin. Pomocí různých kombinací barviv a využití metod nelineární optiky můžeme přeladovat vlnovou délku o rozsahu 300 nm až 1500 nm. Z toho důvodu se lasery používají hlavně ve spektroskopii a také v medicíně (přesným naladěním vlnové délky se ničí rakovinotvorný nádor). [7]

Jejich hlavní nevýhodou je krátká životnost způsobená rozkladem aktivního prostředí teplem. V dnešní době dochází k nahrazování pevnolátkovým laserem. [9]

2. Využití laseru

Vývoj progresivních technologií, které používají jiné zdroje energií, než je mechanická energie, pomáhá při řešení problémů spojených s opotřebením nástroje v procesu obrábění. Kromě opotřebením řeší nekonvenční metody zvyšující se požadavky na kvalitu výrobků a rozměrovou přesnost, možnost komplexního opracování i značně nepravidelných tvarů (nástroje, formy a zápustky), vhodnost uplatnění v automatizovaných provozech nebo také zpracování těžkoobrobitelných konstrukčních materiálů. [7], [13]

Pojem obrobitelnost typický pro obrábění, řezání nebo broušení, ztrácí u nekonvenčních metod svůj význam. V poslední době je snaha tento pojem ponechat ovšem s jiným významem, než jaký byl použit pro klasické konvenční obrábění. Podstatou je, že v místě oddělování částic materiálu nepůsobí řezná síla, nevzniká řezný odpor, obráběné součásti se vlivem mechanického zatížení vyplývající z technologického procesu nedeformují. K úběru dochází pomocí tepelných, chemických, abrazivních účinků nebo jejich kombinací. [7] [13]

Mezi metody nekonvenčního obrábění pracující na fyzikálním principu patří i laserové obrábění. Obrobitelnost je u laserového obrábění charakterizována především absorpcí, tepelnou vodivostí a odrazivostí (reflexí). Lepší obrobitelnost pomocí laseru je za předpokladu nejvyšší možné absorpce materiálu, menší tepelné vodivosti a co nejmenší odrazivostí povrchu obrobku.

Možnosti aplikace laserové technologie se za dobu její existence rozšířila do spousty oborů. Aplikace laseru je závislá na vlastnostech výstupního paprsku. V dnešní době má laser jako přístroj zastoupení v medicíně až po astronomii. [1]

2.1 Využití laseru pro technologické účely

Zásadní a široké uplatnění laseru můžeme nalézt ve strojařské výrobě. V současnosti se laserové technologie v procesech úběru materiálu (obrábění) dělí na dvě skupiny:

- *Laserové obrábění (LM - Laser Machining)* představuje tradiční opracování jako je řezání, vrtání, tvarové opracování.
- *Laserem podporované obrábění (LAM - Laser Assited Machining)* laser zde slouží jako tepelný zdroj pro ohřev (natavení) povrchu před vlastním obráběním (obr.13). Používá se především jako alternativa k procesu řezání a broušení tvrdých kalených materiálů a keramiky.

2.1.1 Laserové řezání a vyřezávání

Parametry laserového záření pro řezání

Laserový paprsek je charakterizován vlnovou délkou, výkonem, rozdělením hustoty energie v průřezu, polarizací, divergencí a průměrem. Pro dosažení nezbytné hustoty energie při řezání je laserový svazek zaostřen (fokusován) optikou, která je dána ohniskovou vzdáleností, transparentí, absorpcí a reflexivitou, fokusační plochou a hloubkou ostrosti. Řezný proces potom ovlivňuje poloha ohniska fokusační optiky vzhledem ke vztahu k povrchu řezaného materiálu. Spousta parametrů je nastavena typem stroje a nelze je již měnit, pro vlastní proces, který ovlivňuje kvalitu řezu, jsou důležité tyto parametry: [20], [14]

- *výkon laserového paprsku*
- *transparente (propustnost) fokusační optiky*
- *ohnisková vzdálenost optiky*
- *poloha ohniska ve vztahu k povrchové ploše obrobku*
- *řezná rychlost (rychlost posuvu)*
- *přídavný plyn (druh plynu, tlak plynu)*

Termo-fyzikální vlastnosti řezaného materiálu: [20]

- *reflexivita řezaného materiálu rozhodující pro vlnovou délku laserového paprsku*
- *hustota materiálu*
- *tepelná kapacita*
- *skupenské teplo tání*
- *tepelná vodivost*
- *teplota tání*

Hodnocení kvality povrchu v místě řezu

Výsledný řez můžeme kontrolovat pouhým okem. Mezi tato kritéria patří vydrolení materiálu, otřepy či drsnost po řezání. Pro přesnější vyhodnocení lze využít metalografických zkoušek a doplňkových zařízení pro měření drsnosti, kolmosti a šířky mezery řezné spáry. Vyhodnocení tepelných řezů lasem probíhá dle normy ČSN EN ISO 9013. [19]

Drsnost

Při řezání materiálu pomocí laserového paprsku jsou rýhy v rovině rovnoběžné k ose paprsku. Drsnost je určena hloubkou rýh, které vzniknou při průchodu paprsku materiálem. U řezání laserem se drsnost zvyšuje s rostoucí tloušťkou materiálu.

Tvar a šířka řezu

Šířka řezu je definovaná jako vzdálenost mezi povrchy řezu na horní hraně řezu nebo pokud došlo k natavení horní hrany, bezprostředně pod tímto natavením hrany. Šířka řezu se zvětšuje s rostoucí tloušťkou materiálu. Záleží na těchto faktorech:

- *ohniskový průměr*
- *materiál*
- *vlnová délka*
- *postup řezání*

Otřepy

Tvoří nejdůležitější kritérium pro vyhodnocování řezu zhotovené laserem. Otřepy (ulpívající struska) se může vyskytovat na dolní hraně řezu. Je těžko odstranitelná, tím pádem je zapotřebí dodatečné operace. Může vzniknout několik druhů otřepů. Od drobných otřepů, které lze snadno odstranit až po ostré a tvrdé otřepy, které lze odstranit například broušením.

Skluz

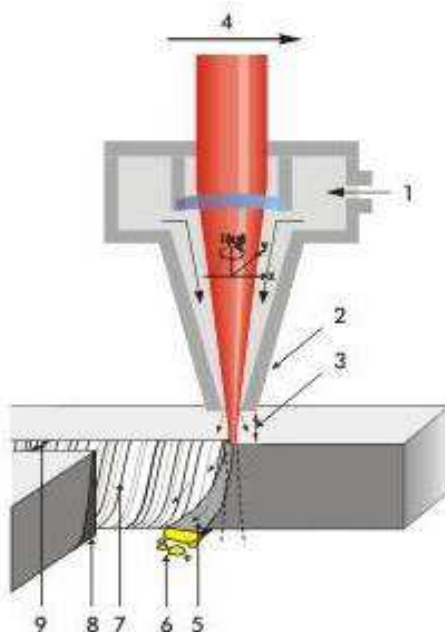
Skluz je definován jako průmět vzdálenosti mezi dvěma body skluzové rýhy ve směru řezání.

Technologie tepelného dělení materiálu laserem patří mezi nejvíce používané procesy laserového obrábění. Jako většina laserových procesů je založena na vysoké hustotě výkonu, produkovaného laserovým zařízením. Řezný proces probíhá na základě vzájemného působení laserového paprsku, řezného plynu a řezaného materiálu. Paprsek, který na materiál působí, musí natavit materiál na teplotu, která vede ke změně pevné fáze materiálu na kapalnou a plynnou. Pásma, které absorbovaný laserový paprsek ohřívá až na teplotu tání, se vlivem exotermické reakce s proudícím kyslíkem ještě dále otepluje až k teplotě vznícení. Následuje silné odpařování materiálu, které vede k jeho odvodu. Současně působí i proud řezného plynu, který unáší částice tekutého materiálu mimo

prostor řezu. Roztavené pásmo se pohybuje ve směru řezu a proces natavování se neustále opakuje, (Obr.13). Laserový paprsek v případě kontinuálního řezání tedy stabilně postupuje a představuje vlastní "řezný" nástroj. [15]

Na laserové dělení se nejvíce používají CO₂ lasery v kontinuálním režimu. Snahou je co nejrychleji lokálně odstranit materiál působením zaostřeného (fokusovaného) paprsku a proudu plynu při vzniku co nejmenší tepelné ovlivněné oblasti. Řezání může probíhat několika způsoby:

- **Sublimační řezání** - laserový paprsek ohřívá povrch materiálu na teplotu odpařování a pomocný plyn odstraňuje páru na čele řezu.
- **Tavné řezání** - silný proud interního plynu odstraňuje roztavený materiál. Nevýhodou je horší jakost řezu způsobená tuhnutími kapkami na spodní straně řezu.
- **Řezání s aktivním plynem** - používá se většinou kyslík, který způsobuje exotermickou reakci, při které dochází ke spalování základního materiálu. Tím se také dosahuje rychlejšího ohřevu, vyšší rychlosti řezání s kvalitním povrchem řezu.[1], [13]



Obr.13. *Schéma procesu řezání materiálu laserem* [14]

1-přívod asistenčního plynu, 2-laserová tryska, 3-vzdálenost trysky od povrchu materiálu, 4-směr řezání, 5-odtavený materiál, 6-struska, 7-kvalita vzniklého řezu, 8-tepelně ovlivněná oblast, 9-šířka řezu

Kvalitu řezu ovlivňuje široký záběr parametrů, stejně jako vlastnosti materiálu při kontaktu s laserovým paprskem (absorpce, tepelná vodivost, teplota tavení). Nelze proto stanovit optimální podmínky pro řezání, je možné pouze vycházet ze všeobecných doporučení výrobců. [10]

2.1.2 Vrtání laserem

Velmi časté použití v automobilovém a leteckém průmyslu je technologie vrtání laserem. Při vrtání zahřívá paprsek laseru povrch materiálu rychlostí 1010 °C/s, poté se materiál do určité hloubky odpaří a umožní tak proniknutí dál do větší hloubky. Intenzita svazku musí být mnohem vyšší, než u jiných aplikací laseru, proto se používá impulsivních laserů s délkou impulsu menší než 1 ms. Laserem je možno vrtat průběžné otvory, slepé otvory kruhové nebo tvarové. Při využití přídavného plynu se aplikují podobné podmínky jako u řezání.

V závislosti na výkonu laseru může vrtání probíhat několika způsoby:

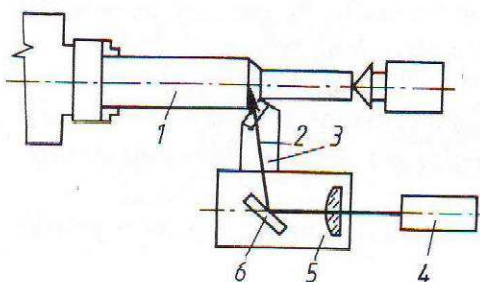
- **Jednorázové** – dochází k úplné penetraci po dopadu pulsu na materiál, odpaření vrstvy do až 6 mm
- **Postupné** – odpařování jednotlivých vrstev po dopadu série pulsů na jedno místo
- **Trepanační** – metoda se používá pro průměry větších otvorů, než je průměr svazku (působení série pulsů podél požadovaného otvoru-vrtání jádra)

Podle druhu obráběného materiálu se používají různé typy laserů. Nd-YAG laser se používá na vrtání otvorů do diamantu, safíru, keramiky, kovy s vysokým bodem tavení. CO₂ laser se doporučuje pro nekovové materiály, sklo nebo plasty. [1], [13]

2.1.3 Soustružení s podporou laseru

Rozvoj laserové technologie umožnil proniknout i jako podpora při konvenčním obrábění. Pro soustružení s využitím laseru můžeme využít tři metody. První možností je bezkontaktní odtavení materiálu. Důležitou výhodou je odstranění složitosti při upínání součástí, neboť na obrobek působí pouze paprsek laseru. Nevýhodou při soustružení laserem je malá intenzita úběru materiálu v porovnání s klasickým obráběním.

Soustružení se předehřevem vychází z poznatku, že s rostoucí teplotou se mění jeho mechanické vlastnosti. Princip spočívá v nasměrování paprsku na obráběnou plochu součástí bezprostředně před břit, (Obr.14). [7], [13]



Obr.14. Obrábění s předehřevem materiálu paprskem laseru před nástrojem [14]

1-obrobek, 2-paprsek, 3-řezný nástroj, 4-laser, 5-suport soustruhu, 6-zrcadlo

Třetí metodou laserového obrábění je odřezávání materiálu dvěma různoběžnými paprsky laseru. Dva nezávislé paprsky jsou vůči sobě skloněný a určitý úhel.

Laserové technologie se s rostoucími požadavky na obrábění velmi malých rozměrů začaly prosazovat do oboru mikroobrábění. Používá se hlavně pro obrábění keramických materiálů v elektrotechnickém průmyslu a také popisování (označování) dílů. [13]

2.1.4 Laserové svařování

Využívá optického záření k roztavení materiálu s minimálním odpařením.

Laser je schopen dodávat vstupující energii ve velmi zfokusované formě, což umožňuje vytvořit hluboký a úzký svar s minimální tepelně ovlivněnou oblastí. Navíc objem roztavené oceli je velmi malý, proto je možno pracovat i při větších tloušťkách bez přídavného materiálu. Zfokusovaný laserový paprsek je schopen roztavit a částečně i odpařit zpracovávaný materiál. Na povrchu materiálu se vytvoří dutina vyplněná parami kovů o vysokém tlaku a roztaveným materiálem, který je s parami kovu v rovnovážném stavu. Tato dutina funguje jako výborný absorbér laserové energie. Protože tvar této dutiny je hluboký a úzký, zanechává laser hluboký a úzký svar.

Tavná lázeň se chrání před oxidací ochrannou atmosférou, složenou obvykle z dusíku, argonu, oxidu uhličitého nebo helia. Změnou parametrů laserového paprsku se může ovlivnit konečná šířka svaru. Kontrola procesu svařování je zabezpečována ovládáním výkonu laseru a regulací svařovací rychlosti. [15]

2.1.5 Povrchová úprava materiálu laserem

Metody laserového povrchového zpracování kovů zahrnují různé druhy:

- **Bez natavení povrchu** (popouštění, kalení s polymorfními změnami)

Proces, při kterém se zvýší teplota v místě zpracovávaného materiálu vlivem působení laserového svazku nad eutektoidní teplotu, současně pod teplotu tavení příslušného materiálu. Při ochlazení hraje důležitou roli objem dílce, dojde totiž k odvodu tepla z ozařovaného povrchu do jeho objemu a tím se vytvoří metastabilní struktura. [4]

- **S natavením povrchu** (legování, nanášení povrchových vrstev)

Při tomto postupu se využívá vysoká hustota výkonu a poměrně krátká doba ozáření, aby se velmi rychle přetavila povrchová vrstva dílce. Následuje ochlazení, které zaručí dosažení velmi jemné amorfní struktury se zvýšenou odolností proti opotřebení a korozi.

- **S odpařením povrchu** (odstranění mikronerovností)

Technologie spočívá v působení laserového paprsku tangenciálně na povrch rotující součásti, čímž dochází k zahlazování mikronerovností a snižování drsnosti povrchu. K úběru materiálu dochází odpařením nebo natavením pomocí laserového paprsku a následným odstraněním taveniny proudem přídavného plynu. [4]

3. Experimentální část

Experimentální část se zabývá vlivem procesních parametrů laserového obrábění na kvalitu řezu. Kvalita řezu je hodnocena podle dílčích kritérií, mezi které patří: drsnost, tvar a šířka řezu, tepelně ovlivněná oblast a ulpívající struska (otřepy). Cílem této diplomové práce je zaměřením se na omezení výskytu otřepů na spodní hraně řezu a minimálního tepelného ovlivnění základního materiálu. Práce vznikla na základě požadavku firmy Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o., v jejichž podmínkách byly provedeny obě části experimentu. Závěrečné vyhodnocení proběhlo v laboratoři pro metalografickou analýzu VŠB - TU Ostrava.

V první části experimentu bylo provedeno srovnání kvality řezu na výskyt otřepů při řezání na plynovém CO₂ a pevnolátkovém Nd-YAG laseru. Po metalografickém šetření a důkladném vyhodnocení vyřezaných vzorků se druhá část experimentu věnovala optimalizování řezných podmínek na CO₂ laseru v závislosti na omezení množství otřepů. Materiálem pro laserové řezání byla slitina INCONEL 625, která se používá pro aplikace v leteckém průmyslu.

3.1 Použitý laserový systém-Winbro Delta

Pro oba dva typy laseru (Nd:YAG, CO₂) byl použit stejný laserový systém WINBRO DELTA, (Obr.15). Tento systém umožňuje konfiguraci na čtyři různé typy laserových zdrojů tak, aby nastavení odpovídalo dané laserové technologii. Robustní konstrukce zajišťuje potřebnou stabilitu pro přesný provoz i při obrábění složitých součástí s průměrem do 1900 mm, výškou 500 mm a hmotností až 500 kg. [16]

Technická specifikace stroje: [16]

- řídicí systém Heidenhaim iTNC 530 a PC řídicí systém,
- kapacitní snímání vzdálenosti trysky,
- kontaktní sondování,
- rychlá změna nastavení systému trysky,
- havarijní systém ochrany,
- integrace CAM softwaru,
- možnost 3D řezání.



Obr.15. Laserový systém Winbro Delta [16]

3.1.1 Nd-YAG laser

Pro řezání na pevnolátkovém typu laseru Nd-YAG byl použit zdroj typu JK704 LD, který disponuje maximálním výkon v kratších délkách impulsů.

Technické údaje zdroje JK 704 LD: [17]

- Vlnová délka 1,06 μm
- Maximální výstupní výkon až 20 kW
- Průměrný výkon 250 W
- Délka impulsu 0,3-5 ms



Obr.16. Zdroj JK 704 LD [17]

3.1.2 CO₂ laser

Pro řezání probíhající v kontinuálním režimu na CO₂ laseru byl použit zdroj Rofin DC 020. Variabilita zdroje umožňuje využití pro mnoho aplikací, při nastavení na laserové řezání vykazuje velmi dobré vlastnosti, a to především ve vynikající kvalitě paprsku a vysokou účinnost.

Technické údaje zdroje Rofin DC 020: [18]

- Vlnová délka 10,6 μm
- Výstupní výkon 2000 W



Obr.17. Rofin DC 020 [18]

3.2 Materiál, tvar a rozměry zkušebních vzorků

3.2.1 Materiál INCONEL 625

Jde o nemagnetickou, korozně a oxidačně odolnou slitinu niklu a chromu, vyznačující se výbornými mechanickými vlastnostmi při nízkých a extrémně vysokých teplotách. Přísada prvků molybdenu a niobu je zodpovědná za vynikající pevnost, kterou bychom u jiných slitin dosáhli až při tepelném zpracování. Díky výrazné odolnosti vůči agresivnímu prostředí nachází uplatnění v chemickém průmyslu, v lodním stavitelství a také pro využití v leteckém průmyslu. Obrábění této slitiny se klasifikuje jako středně těžké až těžké.

Tab.1. *Chemické složení slitiny INCONEL 625* [13]

Ni	Cr	Fe	Mo	Nb+Ta	C	Mn	Si	P	Al	Ti	Cb
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
58	22	5	9	3,5	0,1	0,35	0,35	0,015	0,2	0,2	1

Pozn. Hodnoty jsou uvedeny v hmotnostních procentech.

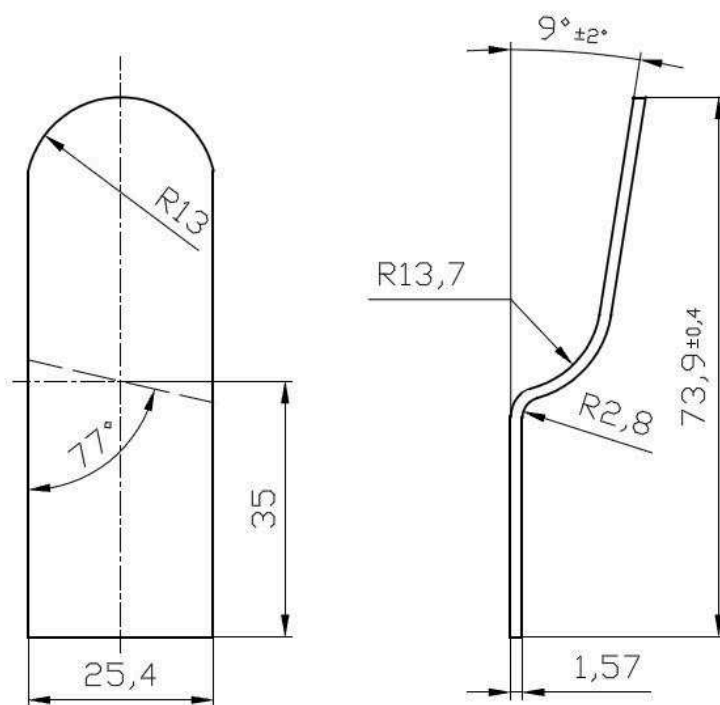
Tab.2. *Mechanické vlastnosti slitiny INCONEL 625* [13]

Hustota	Teplota tavení	Modul pružnosti	Mez pevnosti	Mez kluzu	Tažnost
[g.cm ⁻³]	[°C]	Re [GPa]	Rm [MPa]	Re [MPa]	[%]
8,44	1290-1350	208	965	480	54

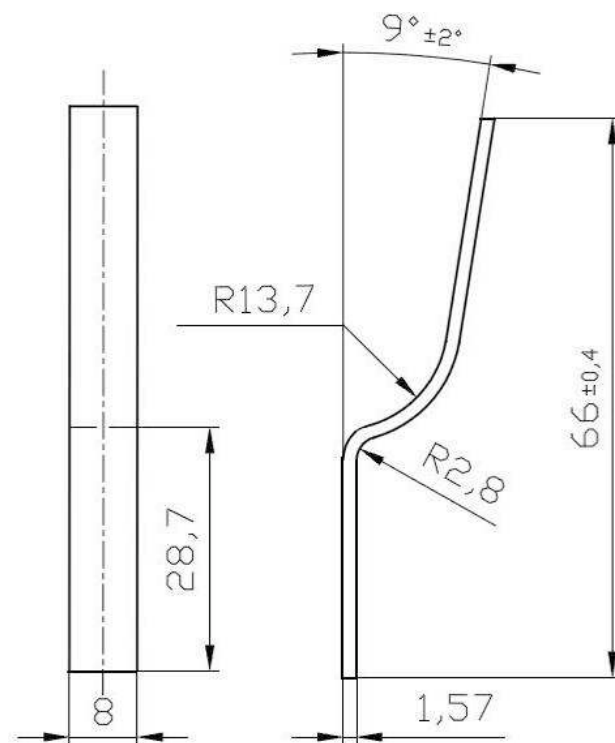
3.2.2 Tvar a rozměry zkušebních vzorků

Tvar a rozměry řezaných vzorků byly zvoleny dle zadání firmy Honeywell. Jednalo se o díly, na kterých byla velmi důležitá kvalita řezu.

Pro první část experimentu byla použita geometrie specifického tvaru, (Obr.18). Pro další část experimentu, probíhající pouze na plynovém CO₂ laseru, byla z důvodu úsporných opatření zvolena částečně odlišná geometrie, (Obr.19). Poskytnutý materiál ve formě plechu měl pro obě dvě části experimentu stejné rozměry 200 mm x 169 mm. Tloušťka materiálu byla 1,57 mm. Před vlastním laserovým řezáním, došlo k úpravě plechu na ohýbacím stroji. Upravený plech byl pro laserové řezání upnut do speciálního přípravku na stůl stroje.



*Obr.18. Tvar a rozměry vzorků pro první částí experimentu-řezání laserem
Nd:YAG a CO₂*



Obr.19. Tvar a rozměry vzorků pro druhou část experimentu-řezání laserem CO₂

3.3 Laserové řezání vzorků

V první části experimentu bylo řezání provedeno na dvou nejpoužívanějších průmyslových typech laserů, pevnolátkovém Nd:YAG a plynovém CO₂. Hlavním cílem bylo zjištění, jak se změní kvalita řezu daného materiálu v závislosti na typu laseru. Na základě metalografického vyhodnocení velikosti tepelně ovlivněné oblasti, která byla zřetelně větší u řezu pevnolátkovým laserem, jsme se zaměřili pouze na CO₂ laser.

3.3.1 Řezání vzorků na plynovém (CO₂) a pevnolátkovém (Nd:YAG) laseru

Oba typy laserů mohou pracovat v kontinuálním nebo pulzním režimu. Vysoký výkon u laseru pracujícího v kontinuálním režimu přenáší značné množství tepla do stěny řezu a okolního materiálu, což způsobuje výrazné zhoršení kvality řezu. Pulzní výkon laseru lze využít ke zmírnění těchto problémů a produkovat kvalitnější řezy. V pulzním režimu je výkon cyklicky zapínáný a vypínáný. Během doby, kdy nepůsobí pulzy, se materiál stihne ochladit na relativně nižší teplotu.

Nevýhodou je, že absorpce většiny konstrukčních materiálů je v oblasti vlnové délky CO₂ laseru (10,6 μm) poměrně nízká oproti laserům pevnolátkovým pracujícím s vlnovou délkou 1,06 μm. Velkou výhodou pevnolátkových laserů je také možnost vedení paprsku pomocí optického vlákna do místa řezu oproti komplikovaným sestavám zrcadel v případě vedení paprsku CO₂ laseru.

Srovnání parametrů vybraných druhů laseru

Tab.3. Porovnání provozních vlastností laserů [13]

Typ	Nd-YAG	CO ₂
<i>Vlnová délka [μm]</i>	1,06	10,6
<i>Účinnost [μm]</i>	2-5	5-15
<i>Aktivní prostředí</i>	YAG krystal	CO ₂ plyn
<i>Šířka řezu [μm]</i>	30	2000
<i>Druh provozu</i>	Kontinuální/pulzní	Kontinuální/pulzní

Kvalita řezu je silně závislá na tom, jaké množství tepla a v jaké rychlosti je přenášeno během řezání do materiálu. Zpracovávaným materiálem je totiž vysoce kvalitní slitina pracující v extrémních podmínkách leteckého průmyslu, a proto se klade

velký důraz na co nejmenší ovlivnění struktury základního materiálu vlivem laserového řezání. Využití poznatků o pevnolátkových laserech vedlo k provedení zkušebních řezů na dílci a následné srovnání s kvalitou řezu při použití plynového laseru. Výchozí parametry řezání pro oba typy zdrojů byly voleny na základě technické dokumentace firmy a zkušenostmi s řezáním daného typu materiálu.

- **Řezání na Nd:YAG laseru**

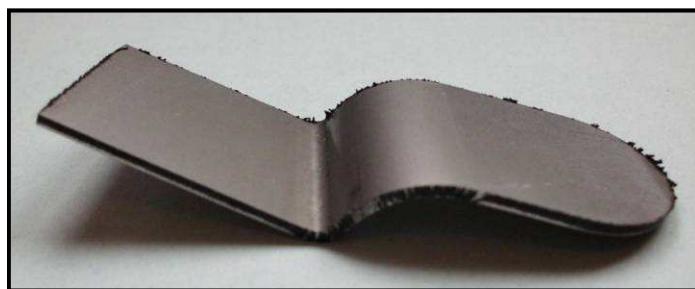
Při řezání byl použit asistenční plyn ve formě dusíku velmi vysoké čistoty v tlakové láhvi umístěné u stroje. Vzdálenost trysky od povrchu materiálu činila 3 mm a poloha ohniska byla 1,5 mm pod povrchem materiálu.

Tab.4. Řezné parametry pro pevnolátkový Nd:YAG laser

Zdrojové parametry laseru				Procesní parametry laseru	
Frekvence [Hz]	Vzdálenost trysky [mm]	Tlak plynu [bar]	Šířka pulzu [ms]	Průměrný výkon [W]	Rychlost posuv [mm.min ⁻¹]
100	3	13	0,3	210	220



Obr.20. Vyřezaný vzorek z Nd-YAG laseru-horní strana



Obr.21. Vyřezaný vzorek z Nd-YAG-spodní strana

- **Řezání na CO₂ laseru**

Stejně jako u pevnolátkového laseru byl použit stejný typ plynu při tlaku 1,3 MPa. Vzdálenost trysky se změnila, a to na hodnotu 0,9 mm od povrchu řezaného materiálu.

Tab.5. Řezné parametry pro plynový CO₂ laser

Zdrojové parametry laseru				Procesní parametry laseru	
Frekvence [Hz]	Vzdálenost trysky [mm]	Tlak plynu [bar]	Průměr trysky [mm]	Průměrný výkon [W]	Rychlost posuvu [mm.min ⁻¹]
100	0,9	13	1,3	640	700



*Obr.22. Vyřezaný vzorek z CO₂ laseru-
horní strana*

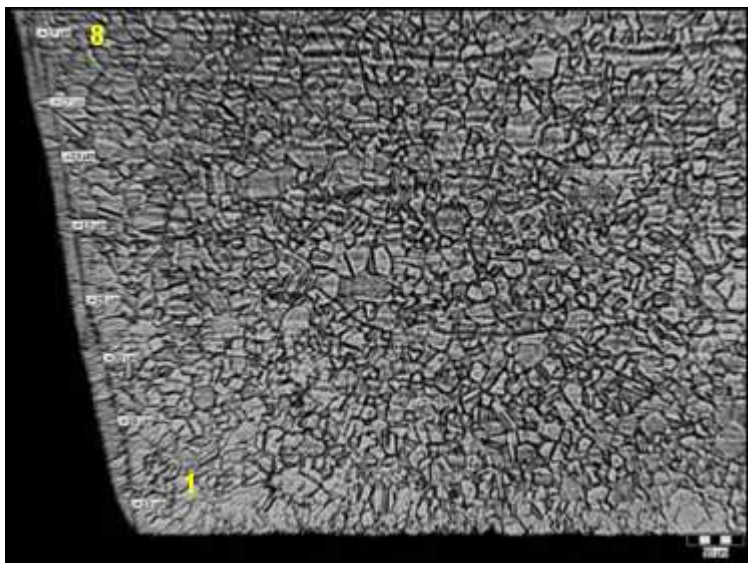


*Obr.23. Vyřezaný vzorek z CO₂ laseru-spodní
strana*

Po vyřezání obou vzorku na laserech bylo vizuální kontrolou zjištěno, že kvalita vzniknutého řezu je výrazně lepší při použití pevnolátkového typu laseru. Hlavním a na první pohled viditelným kritériem byla ulpívající struska ve formě otřepů. Výskyt otřepů u vzorku CO₂ byl větší a nerovnoměrný po celém po obvodu vzorku. Příčinou bylo ulpívání strusky na protikuse vlivem možného nedokonalého vystředění paprsku vůči trysce.

Dalším důležitým parametrem byla velikost tepelně ovlivněné oblasti (TOO). Pro kontrolu TOO nestačilo zkoumání pouhým okem, ale musela být provedena

makroskopická prohlídka metalografickým šetřením dle standardního postupu, který je uveden v kapitole 4.1 (metalografické vyhodnocení).



Obr.24. Řez vzorku Nd:YAG laserem-horní polovina řezu (100x)

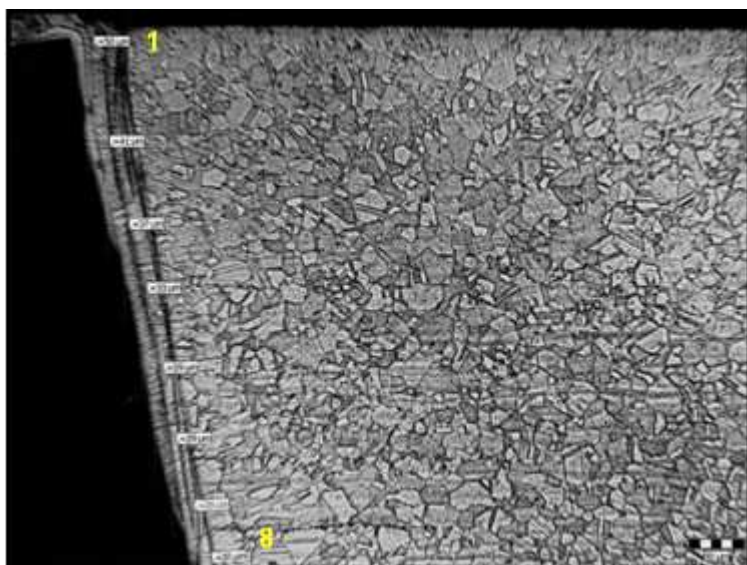
Na Obr.24 je zobrazena vrchní část řezu (náběh) s jasně zřetelnou, mírně se rozšiřující přetavenou vrstvou. Velikost tepelně ovlivněné oblasti byla při dokumentaci na světelném mikroskopu změřena a zpracována do Tab.6.

Tab.6. Naměřené hodnoty šířky TOO

Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8
Naměřená hodnota [μm]	13	19	20	15	13	13	17	17

Tab.7. Statistické zpracování naměřených hodnot TOO

Průměrná hodnota [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
15,9	2,6



Obr.25. Řez vzorku Nd:YAG laserem-spodní polovina řezu (100x)

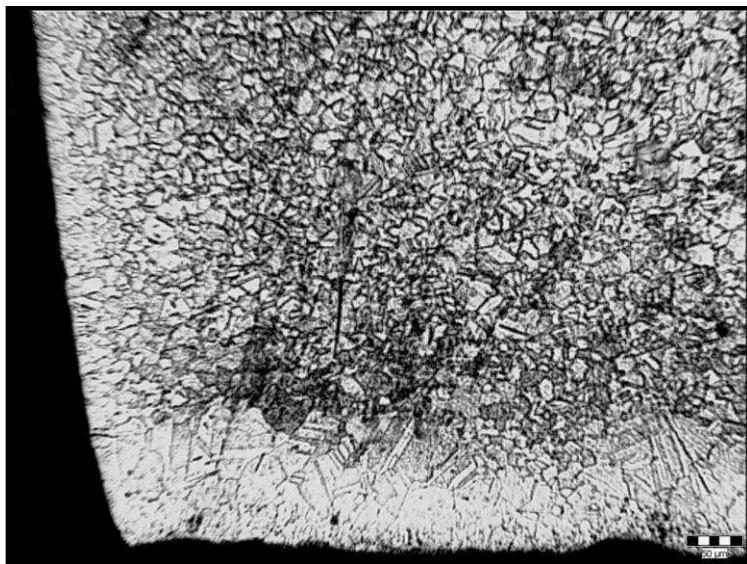
Tab.8. Naměřené hodnoty velikost šířky TOO

Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8
Naměřená hodnota [μm]	50	41	37	33	29	29	26	20

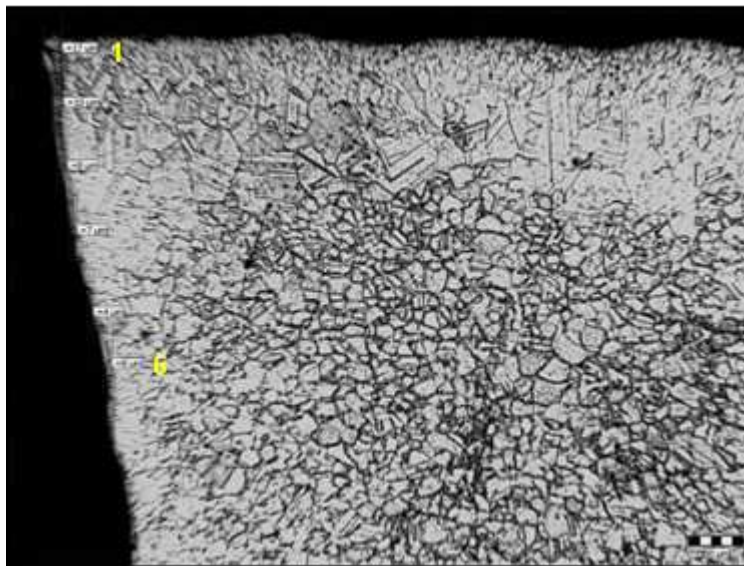
Tab.9. Statistické zpracování naměřených hodnot TOO

Průměrná hodnota [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
33,1	8,8

Měření vzdálenosti TOO bylo provedeno od spodní části řezu směrem ke horní části. Přetavená vrstva začíná nabývat hodnot již od začátku řezu a šířka se průběžně zvětšuje až do konce řezu, kde dojde k mírnému ulpění taveniny ve formě otřepu.



Obr.26. Řez vzorku CO_2 laserem-horní polovina řezu (100x)



Obr.27. Řez vzorku CO_2 laserem-spodní polovina řezu (100x)

Tab.10. Naměřené hodnoty velikosti TOO

Číslo měření	1	2	3	4	5	6
Naměřená hodnota [μm]	17	10	8	7	8	4

Tab.11. Statistické zpracování naměřených hodnot TOO

Průměrná hodnota [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
9	4

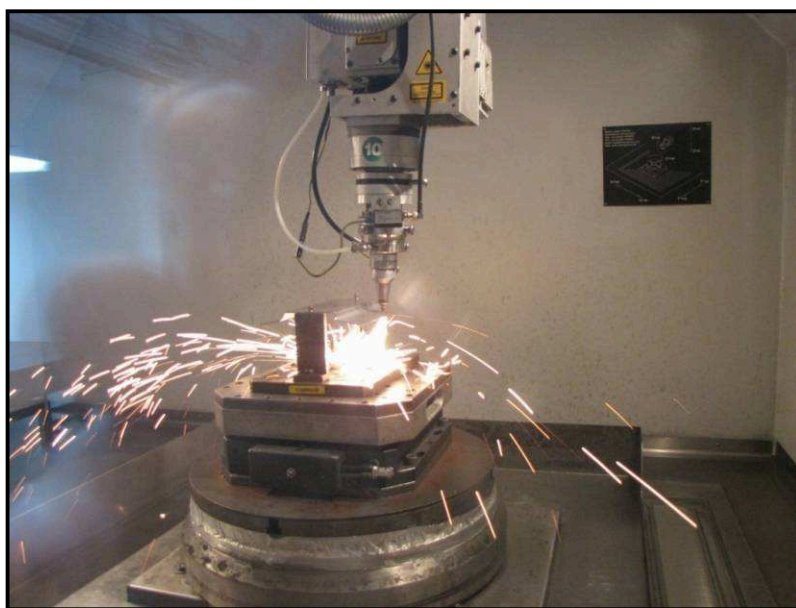
Jak můžeme vidět na Obr.27 je průběh přetavené vrstvy na rozdíl od řezání na pevnolátkovém laseru nepravidelný a až ve spodní části nabývá hodnot. Tento jev je pravděpodobně způsoben procesem řezání, kdy dochází k postupnému odtavení materiálu, při průchodu laserového paprsku. Tavenina vlivem bariéry, v podobě neprořezaného materiálu, nemohla odcházet ven z řezu, hromadí se a tím dojde k částečnému prohřátí základního materiálu, které vede k přetavení a změně struktury.

Přestože se požadavky kladené na jakost a vzhled, jeví vizuální kontrolou lepší u řezu provedeného na pevnolátkovém typu laseru, metalografickým šetřením bylo zjištěno vysoké teplotní ovlivnění základního materiálu, a tím i zásadní změna struktury. Po důkladném vyhodnocení jsme došli k závěru, že další část experimentu bude směřována pouze na optimalizaci parametrů při řezání na plynovém laseru.

3.3.2 Řezání pomocí plynového CO₂ laseru

Postup přípravy vzorků před samotným procesem řezání korespondoval s první částí experimentu. Změna proběhla pouze v geometrii a rozměrech vzorku dle Obr.19, proto muselo dojít k předefinování rezných drah v řídicím systému Heidenhaim.

Bylo vyřezáno celkem 48 vzorků ve třech sadách, po 16 vzorcích. Pro první sadu vzorků (dále sada „a“), byli použity parametry uvedené v Tab.12. Výchozí rychlost posuvu laserového řezání pro všechny sady byla 200 mm.min⁻¹. S každým dalším vzorkem se tato rychlost postupně zvyšovala o hodnotu 100 mm.min⁻¹, konečná rychlost tedy dosáhla hodnoty 1700 mm.min⁻¹.



Obr.28. Průběh řezání vzorků



Obr.29. Ukázka vzorků po vyřezání-spodní strana

- Řezání sady „a“

Tab.12. Řezné parametry pro sadu vzorků typu „a“

Zdrojové parametry laseru		Procesní parametry laseru	
Budicí frekvence zdroje [Hz]	1100	Vzdálenost trysky [mm]	0,9
Plnění [%]	65	Tlak asistenčního plynu [bar]	1,2
Výstupní výkon [W]	1240	Rychlost posuvu [mm.min ⁻¹]	200-1700

Obr.30. Vyřezaný vzorek 2a (rychlost posuvu 200 mm.min⁻¹)Obr.31. Vyřezaný vzorek 9a
(rychlost posuvu 900 mm.min⁻¹)Obr.32. Vyřezaný vzorek 17a
(rychlost posuvu 1700 mm.min⁻¹)

Po vyřezání sady vzorků typu „a“ byla kvalita řezu vyhodnocena jako nejkvalitnější u vzorku číslo 9a, (Obr.31). Nastavením příslušných parametrů se výskyt otřepů podařilo na většině části vzorku eliminovat, pouze v části rádiusu zůstává natavená struska.

- **Řezání sady „b“**

Tab.13. Řezné parametry pro sadu vzorků typu „b“

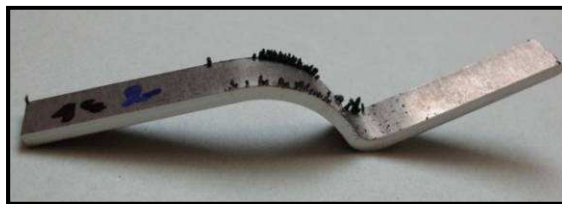
Zdrojové parametry laseru		Procesní parametry laseru	
Budicí frekvence zdroje [Hz]	1100	Vzdálenost trysky [mm]	0,9
Plnění [%]	62	Tlak asistenčního plynu [bar]	1,2
Výstupní výkon [W]	800	Rychlost posuvu [mm.min ⁻¹]	200-1700



Obr.33. Vyřezaný vzorek 2b (rychlost posuvu 200 mm.min⁻¹)

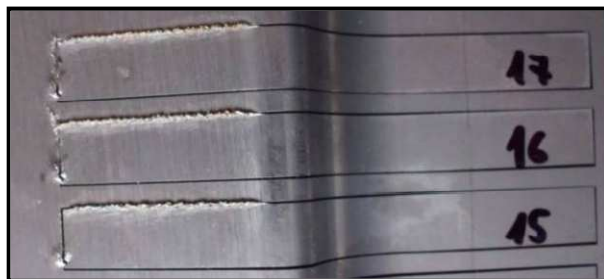


*Obr.34. Vyřezaný vzorek 11b
(rychlost posuvu 1100 mm.min⁻¹)*



*Obr.35. Vyřezaný vzorek 14b
(rychlost posuvu 1400 mm.min⁻¹)*

Nepatrnou změnou parametrů u druhé sady vzorků „b“ se podařilo dojít k podobnému efektu jako u první sady „a“. Výstupní výkon byl snížen na 800 W, plnění na 62%. I přes zjevné otřepy, opět pouze na rádiusu, byl nejkvalitnější vzorek č.14b, vyřezaný při rychlosti posuvu 1400 mm.min⁻¹. Tato rychlost se projevila jako nejnižší možná pro prořezání celé tloušťky. Při kombinaci vyšší rychlosti (1500, 1600 a 1700 mm.min⁻¹), snížení výkonu a plnění nedošlo k prořezání po celém obvodu vzorku. Část vzorku se pouze natavila (Obr. 36).



Obr.36. Detail neprořezaných vzorků 15b, 16b a 17b

- Řezání sady „c“

Tab.14. Řezné parametry pro sadu vzorků typu „c“

Zdrojové parametry laseru		Procesní parametry laseru	
Budicí frekvence zdroje [Hz]	1100	Vzdálenost trysky [mm]	0,9
Plnění [%]	65	Tlak asistenčního plynu [bar]	1,2
Výstupní výkon [W]	1400	Rychlost posuvu [mm.min ⁻¹]	200-1700

Obr.37. Vyřezaný vzorek 2c (rychlost posuvu 200 mm.min⁻¹)Obr.38. Vyřezaný vzorek 11c
(rychlost posuvu 1100 mm.min⁻¹)Obr.39. Vyřezaný vzorek 17c
(rychlost posuvu 1700 mm.min⁻¹)

Čistota řezu a množství natavené strusky se při výběru nejlepší varianty z množství vzorků v sadě,jevila u vzorku č.17c, (Obr.39). Hodnotícím parametrem při výběru nejlepší varianty z celkového množství vzorků v sadě je čistota řezu a omezení otřepů na obou hranách řezné spáry, tedy na straně vyřezaného vzorku, kde došlo k minimálnímu ulpívání natavené strusky a na straně vyřezaného tvaru v plechu. Daným kritériím nejvíce vyhovoval vzorek č.17 c, (Obr.39).

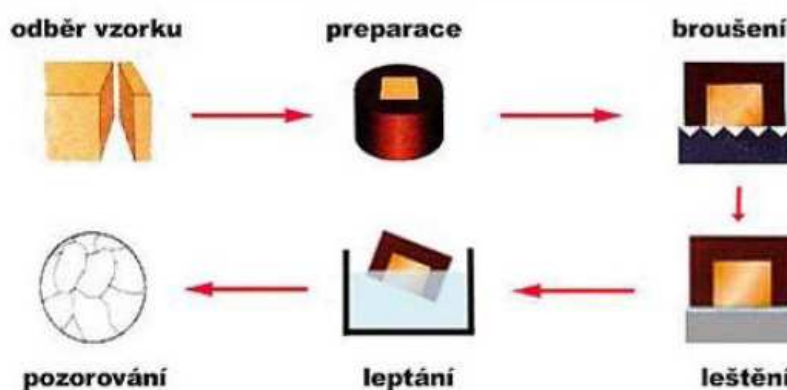
Výkon sady „c“ byl 1400 W a plnění 65%. Nastavením zmíněných parametrů došlo k prořezání všech vzorků, ale nepodařilo se dosáhnout potřebného omezení výskytu otřepů jak na vyřezaných vzorcích, tak i na vyřezaném tvaru v plechu. Zmíněný nepoměr rozložení otřepů na protilehlých hranách řezu může být způsoben špatným vystředěním paprsku. U CO₂ laseru je obtížné vystředit svazek a trysku pomocí kamery z důvodu jiných vlnových délek u zrcadel. Další možný problém ovlivňující rovnoměrné rozložení vzniklých otřepů, může nastat při zápalu, kdy dochází k primárnímu kontaktu laserového paprsku s obráběným materiálem. Po tomto kontaktu může dojít k vytrysknutí taveniny z řezu a následného ulpění na trysce. Tím se změní poloha středu laserového svazku vůči středu trysky.

4. Vyhodnocení

Před závěrečným hodnocením proběhla metalografická analýza vybraných vzorků. Pro metalografické šetření byly vybrány 3 vzorky z každé sady. Výběr měl svá specifická pravidla. Prvním z nich jsme určili vzorek s nejnižší možnou řeznou rychlostí, tedy $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Velikost a množství natavené strusky je dalším z důležitých hodnotících kritérií, dle toho byl vybrán druhý vzorek, splňující podmínku minimálního výskytu otřepů po obvodu. A nakonec třetí vzorek, řezaný při nejvyšší posuvové rychlosti, $1700 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, resp. $1400 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

4.1 Metalografické šetření

Metalografické analýze předchází příprava vzorků. Primárními činnostmi bylo dělení vzorku, preparace, broušení, leštění, leptání a následná dokumentace pomocí světelné mikroskopie.



Obr.40. Ukázka přípravy metalografických výbrusů [20]

- **Odběr menších částí vzorku**

Umístění odběru je závislé na tvaru součásti, rozměrech a především účelem pozorování. Pro zjištění velikosti TOO a změny mikrotvrdosti byl proveden odběr v rovinné části a místě rádiusu. Dělení proběhlo na stolní rozbrušovací pile STRUERS s diamantovým kotoučem. Aby nedošlo k teplotnímu ovlivnění řezu vlivem oddělování vzorku, byla oblast neustále intenzivně chlazena.

- **Preparace vzorků**

Pro usnadnění další manipulace při přípravě a následného vyhodnocení, byly vzorky zality pryskyřicí za tepla a tlaku na zařízení CitoPress-20, firmy STRUERS.

- **Broušení a leštění**

Další fáze přípravy vzorku zahrnovala broušení a leštění na zařízení TegraPol-25, firmy STRUERS. Broušení spočívalo v použití několika brusných SiC papírů o zrnitosti 180, 320, 500, 800, 1200 a 2400. Po použití uvedených brusných papírů bylo provedeno leštění na diamantovém sukně současně s použitím diamantové suspenze.

- **Leptání**

Chemický proces, po kterém dojde ke zviditelnění struktury materiálu. Vzhledem k vlastnostem materiálu INCONEL 625 bylo velmi obtížné najít vhodné činidlo. I přesto se povedlo zviditelnění jednotlivých zrn a tepelně ovlivněné oblasti za pomoci publikace [21].

- **Dokumentace pomocí světelné mikroskopie**

Dokumentování struktury a velikosti tepelně ovlivněné oblasti bylo provedeno na světelném mikroskopu ZEISS NEOPHOT s podporou softwaru QuickPHOTO Industrial 2.2.



Obr.41. Zalité vzorky v pryskyřici a připravené pro dokumentaci

4.2 Vyhodnocení kvality řezu

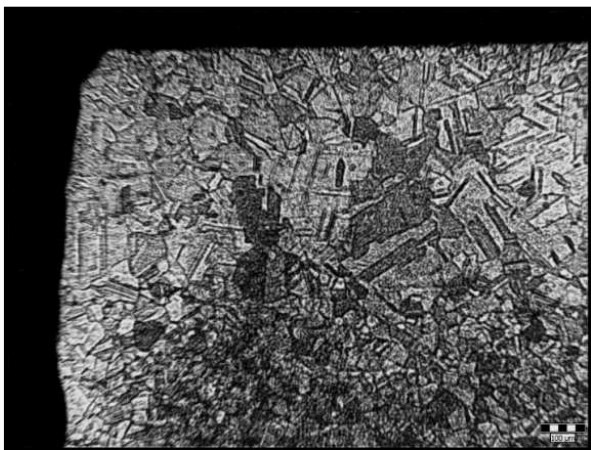
Po vizuálním zhodnocení kvality řezu, především na výskyt otřepů, bylo provedeno mikroskopické sledování metalografických výbrusů. Cílem bylo zjištění možného tepelného ovlivnění materiálu v oblasti řezu. Vnesené teplo do základního materiálu je závislé kromě jiných parametrů především na rychlosti posuvu, proto bylo důležité věnovat tomuto jevu pozornost, (změna rychlosti posuvu je červeně zvýrazněna v pravém spodním rohu tabulky řezných parametrů).

Na vybraných výbrusech vzorků bylo provedeno mikroskopické změření šířky TOO.

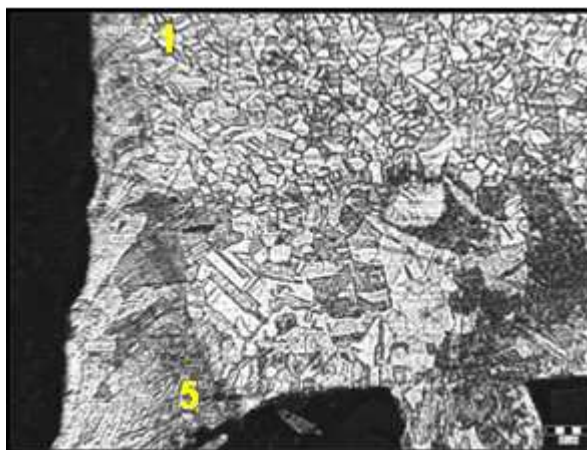
- Řez vzorku č.2a (zkoumané místo v rádiusu vzorku)

Tab.15. Řezné parametry pro vzorek č.2a

Zdrojové parametry laseru		Procesní parametry laseru	
Budicí frekvence zdroje [Hz]	1100	Vzdálenost trysky [mm]	0,9
Plnění [%]	65	Tlak asistenčního plynu [bar]	1,2
Výstupní výkon [W]	1240	Rychlost posuvu [mm.min ⁻¹]	200



Obr.42. Mikrostruktura vzorku č. 2a-vrchní část řezu (100x)



Obr.43. Mikrostruktura vzorku č. 2a-spodní část řezu (100x)

Tab.16. Naměřené hodnoty velikosti TOO

Číslo měření	1	2	3	4	5
Naměřená hodnota [μm]	24	41	51	99	175

Tab.17. Statistické zpracování naměřených hodnot TOO

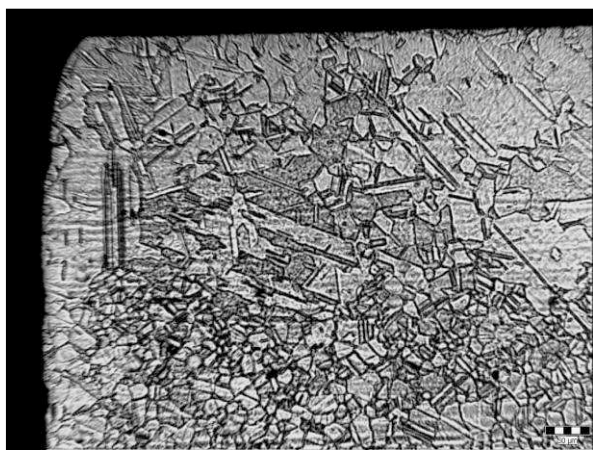
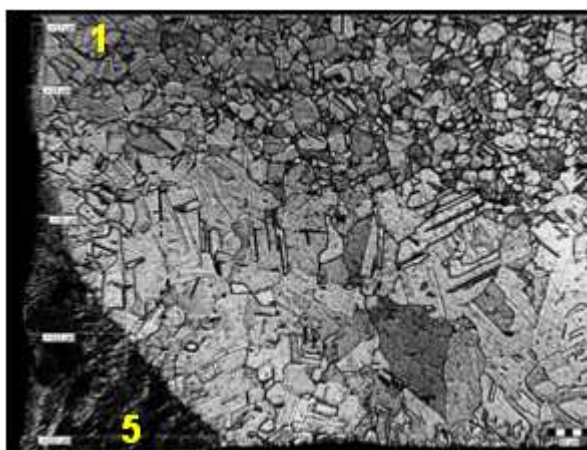
Průměrná hodnota [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
78	54,5

Vzhledem k nízké rychlosti posuvu dochází k delší době odtavování materiálu v místě řezu a to se projeví v geometrických nerovnostech řezu, (Obr. 42). TOO je charakteristická již od poloviny tloušťky vzorku a postupně se rozšiřuje až do hodnoty 175 μm. Lze konstatovat, že volba parametrů nebyla pro výslednou kvalitu řezu vhodná.

- Řez vzorku 9a (zkoumané místo v rádiusu vzorku)

Tab.18. Řezné parametry pro vzorek č.9a

Zdrojové parametry laseru		Procesní parametry laseru	
Budicí frekvence zdroje [Hz]	1100	Vzdálenost trysky [mm]	0,9
Plnění [%]	65	Tlak asistenčního plynu [bar]	1,2
Výstupní výkon [W]	1240	Rychlost posuvu [mm.min ⁻¹]	900

Obr.44. Mikrostruktura vzorku č. 9a (rádius) -
vrchní část řezu (100x)Obr.45. Mikrostruktura vzorku č. 9a (rádius) -
spodní část řezu (100x)

Tab.19. Naměřené hodnoty velikosti TOO

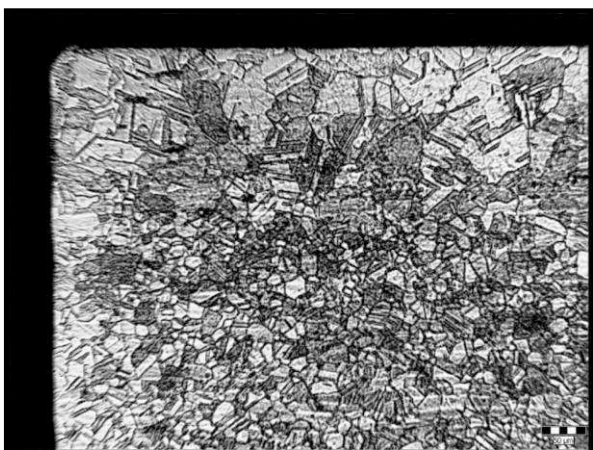
Číslo měření	1	2	3	4	5
Naměřená hodnota [μm]	17	19	36	112	222

Tab.20. Statistické zpracování naměřených hodnot TOO

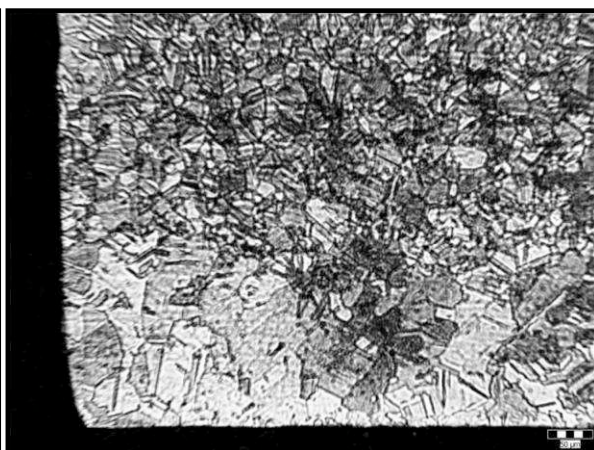
Průměrná hodnota [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
81,2	78,5

Horní část řezu (Obr.44) je bez viditelné TOO. Začátek řezu je mírně zaoblen, zřejmě vlivem náběhu laserového svazku. Zvyšování rychlosti vedlo ke snížení rozsahu výšky TOO, zhruba do 1/3 tloušťky materiálu, zároveň došlo k nežádoucímu rozšíření šířky do základního materiálu. Příčinou může být hromadění taveniny ve spodní části řezu, které je zdrojem vysokého přehřátí vedoucí ke změně struktury.

- Řez vzorku 9a (zkoumané místo v rovinné části vzorku)



Obr.46. Mikrostruktura vzorku č. 9a (rovná část) -vrchní část řezu (100x)



Obr.47. Mikrostruktura vzorku č. 9a (rovná část)-spodní část řezu (100x)

Horní i spodní části jsou bez viditelně větších tloušťek TOO. Kvalita řezu je při stejných podmínkách řezání jako u vzorku odebraného z místa rádiusu, zcela odlišná (kvalitnější).

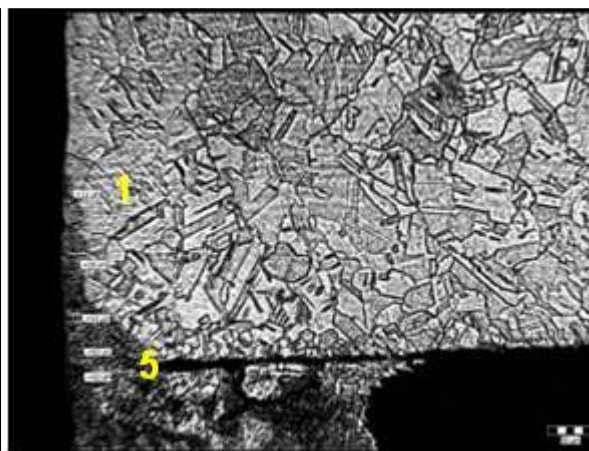
- Řez vzorku 17a (zkoumané místo v rádiusu vzorku)

Tab.21. Řezné parametry pro vzorek č.17a

Zdrojové parametry laseru		Procesní parametry laseru	
Budicí frekvence zdroje [Hz]	1100	Vzdálenost trysky [mm]	0,9
Plnění [%]	65	Tlak asistenčního plynu [bar]	1,2
Výstupní výkon [W]	1240	Rychlost posuvu [mm.min ⁻¹]	1700



Obr.48. Mikrostruktura vzorku č. 17a (rádius)-vrchní část řezu (100x)



Obr.49. Mikrostruktura vzorku č. 17a (rádius)-spodní část řezu (100x)

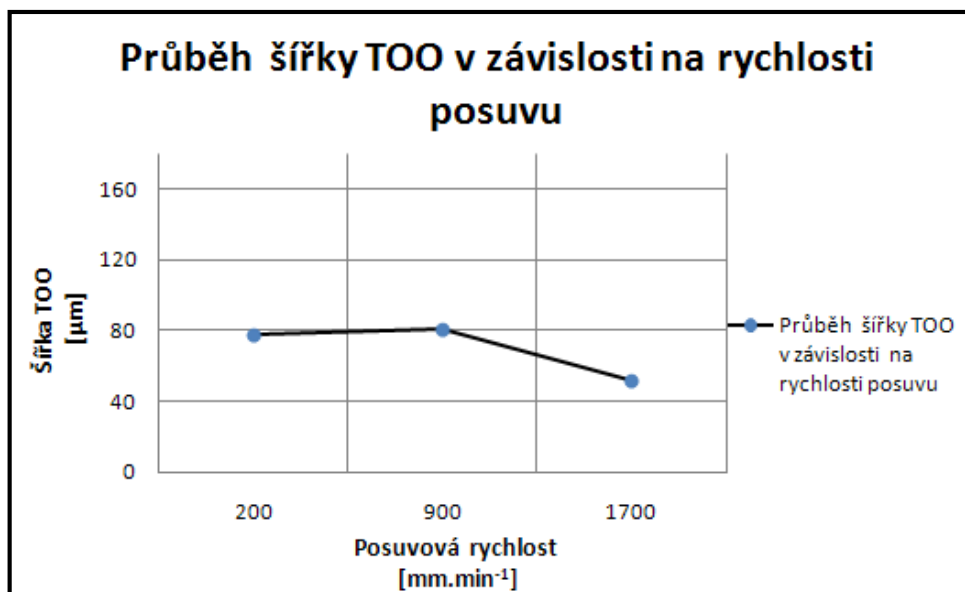
Tab.22. Naměřené hodnoty velikosti TOO

Číslo měření	1	2	3	4	5
Naměřená hodnota [μm]	11	29	43	83	92

Tab.23. Statistické zpracování naměřených hodnot TOO

Průměrná hodnota [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
51,6	31,1

Vyšší rychlost posuvu ($1700 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) měla pozitivní vliv na snížení šířky TOO. Velikost v místě radiusu ve spodní hraně řezu byla $92 \mu\text{m}$. Průměrná hodnota celé, tepelně ovlivněné oblasti činila $51,6 \mu\text{m}$. Na (Obr.49) je ve spodní části řezu vidět nahromaděná struska, spojená pouze šířkou TOO.

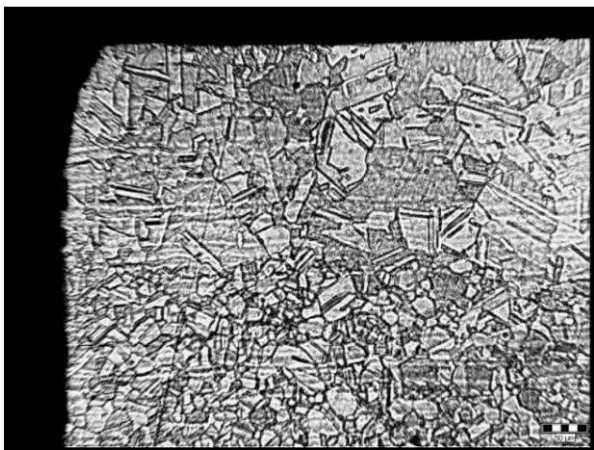
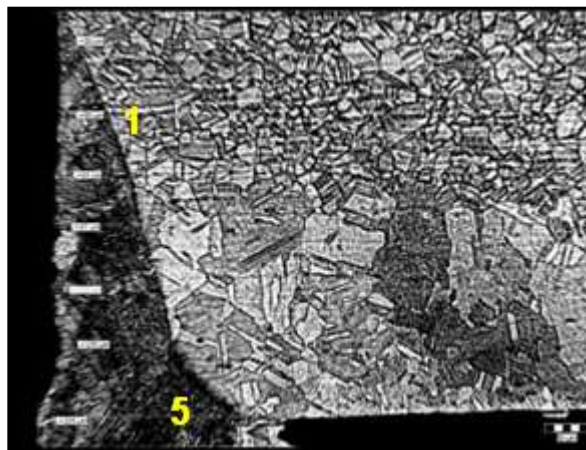


Obr.50. Graf závislosti šířky TOO na řezné rychlosti u sady vzorků „a“

- Řez vzorku 2b (zkoumané místo v rádiu vzorku)

Tab.24. Řezné parametry pro vzorek č.2b

Zdrojové parametry laseru		Procesní parametry laseru	
Budicí frekvence zdroje [Hz]	1100	Vzdálenost trysky [mm]	0,9
Plnění [%]	62	Tlak asistenčního plynu [bar]	1,2
Výstupní výkon [W]	800	Rychlost posuvu [mm.min ⁻¹]	200

Obr.51. Mikrostruktura vzorku č. 2b (rádius)-
vrchní část řezu (100x)Obr.52. Mikrostruktura vzorku č. 2b (rádius)-
spodní část řezu (100x)

Tab.25. Naměřené hodnoty velikosti TOO

Číslo měření	1	2	3	4	5
Naměřená hodnota [μm]	20	55	97	125	225

Tab.26. Statistické zpracování naměřených hodnot TOO

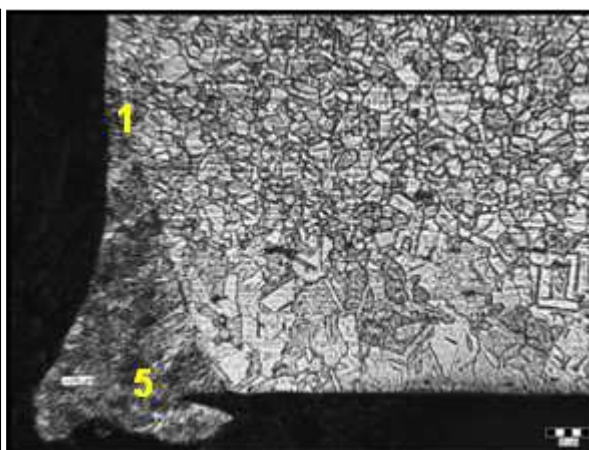
Průměrná hodnota [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
104,4	70,1

Změna parametrů, konkrétně snížení výkonu a plnění neměla zásadní vliv na zmenšení velikosti TOO. Počátek tepelného ovlivnění je viditelný již od poloviny tloušťky řezaného materiálu. Podobně jako u vzorku č.2a proběhlo řezání při nižší rychlostí s tím také doprovodný přenos tepla do základního materiálu.

- Řez vzorku 11b (zkoumané místo v rádiusu vzorku)

Tab.27. Řezné parametry pro vzorek č.11b

Zdrojové parametry laseru		Procesní parametry laseru	
Budicí frekvence zdroje [Hz]	1100	Vzdálenost trysky [mm]	0,9
Plnění [%]	62	Tlak asistenčního plynu [bar]	1,2
Výstupní výkon [W]	800	Rychlost posuvu [mm.min ⁻¹]	1100

Obr.53. Mikrostruktura vzorku č. 11b
(rádius)-vrchní část řezu (100x)Obr.54. Mikrostruktura vzorku č. 11b
(rádius)-spodní část řezu (100x)

Tab.28. Naměřené hodnoty velikosti TOO

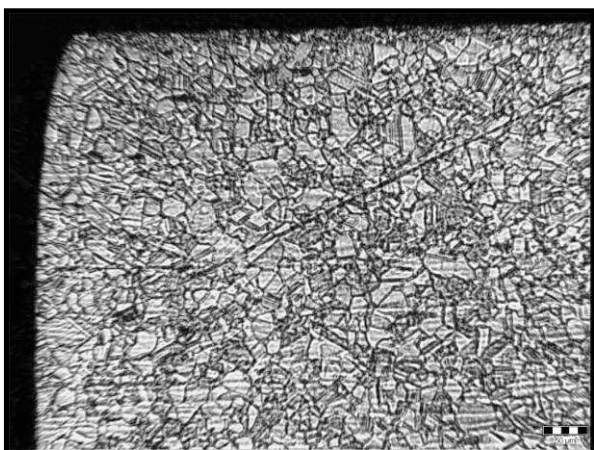
Číslo měření	1	2	3	4	5
Naměřená hodnota [μm]	9	13	37	69	136

Tab.29. Statistické zpracování naměřených hodnot TOO

Průměrná hodnota [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
52,8	46,8

V horní části řezu je zjevná mírně zaoblená náběhová hrana řezu, jinak se tvar řezu jeví bez výrazných nedokonalostí. Spodní část řezu je vlivem vzniku TOO tvarově velmi nedokonalá a zdeformovaná. Dochází zde k podobnému jevu hromadění taveniny ve spodní části řezu, jako u nižších posuvových rychlostí. Tavenina zde při vyšší rychlosti rychleji chladne a tvoří nežádoucí nárůstek, (Obr.54).

- Řez vzorku 11b (zkoumané místo v rovinné části vzorku)



Obr.55. Mikrostruktura vzorku č. 11b (rovná část)-vrchní část řezu (100x)



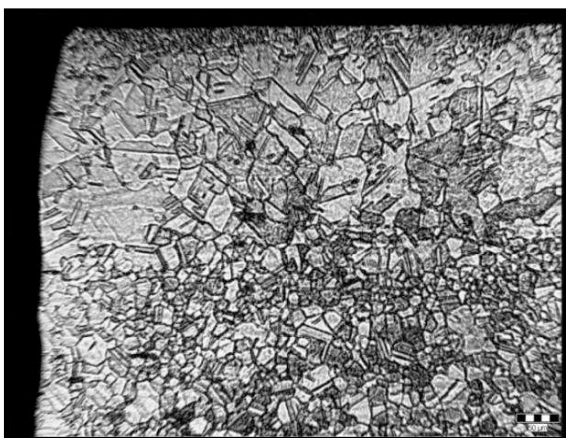
Obr.56. Mikrostruktura vzorku č. 11b (rovná část)-spodní část řezu (100x)

Laserové řezání na rovné části vzorku vykazuje velmi dobré vlastnosti. Podařilo se snížit výskyt otřepů na minimum a teplotní ovlivnění je také nevýrazné. Tvarové odchylky jsou pouze v horní části řezu (Obr.55), kde dochází k mírnému zaoblení hrany řezu.

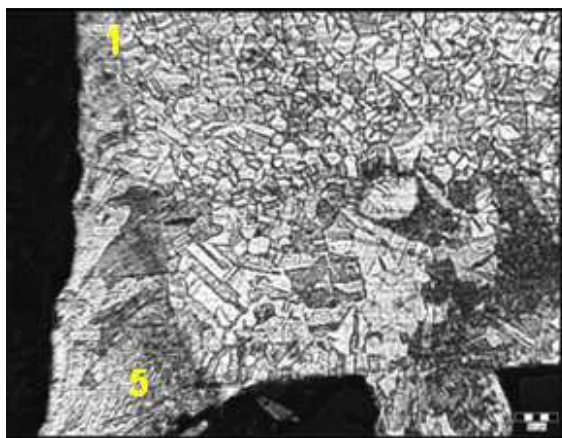
- Řez vzorku 14b (zkoumané místo v rádiusu vzorku)

Tab.30. Řezné parametry pro vzorek č.14b

Zdrojové parametry laseru		Procesní parametry laseru	
Budicí frekvence zdroje [Hz]	1100	Vzdálenost trysky [mm]	0,9
Plnění [%]	62	Tlak asistenčního plynu [bar]	1,2
Výstupní výkon [W]	800	Rychlost posuvu [mm.min ⁻¹]	1400



Obr.57. Mikrostruktura vzorku č. 14b (rádius)-vrchní část řezu (100x)



Obr.58. Mikrostruktura vzorku č. 14b (rádius)-spodní část řezu (100x)

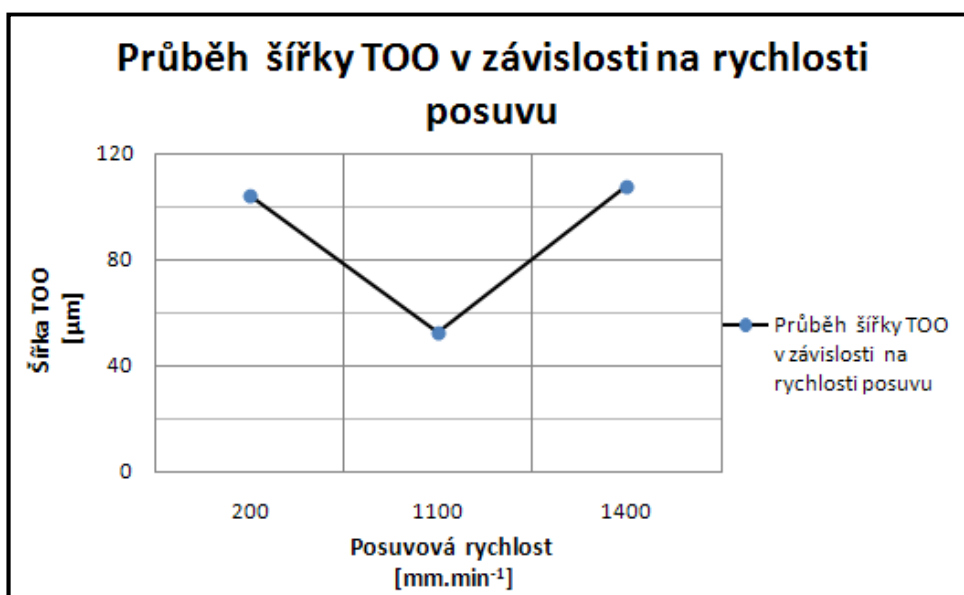
Tab.31. Naměřené hodnoty velikosti TOO

Číslo měření	1	2	3	4	5
Naměřená hodnota [μm]	43	59	96	144	198

Tab.32. Statistické zpracování naměřených hodnot TOO

Průměrná hodnota [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
108	56,9

Řezání vzorku č.14b proběhlo při rychlosti posuvu 1400 mm.min^{-1} , poslední dostačující hodnota pro prořezání celé tloušťky materiálu v sadě parametrů „c“. Čistota řezu je nekvalitní a tvarové deformace jsou zjevné v horní i dolní části řezu. Šířka tepelně ovlivněné oblasti dosahuje hranice 200 μm .

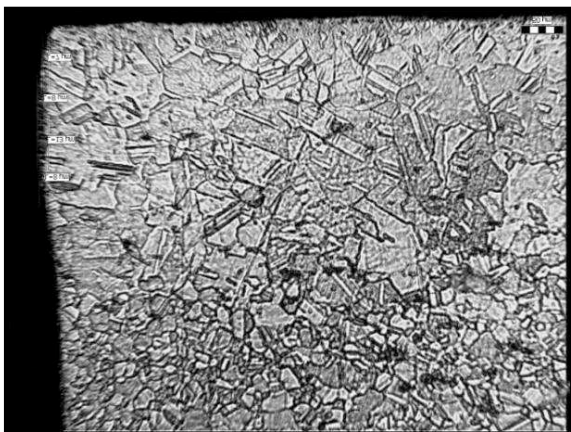
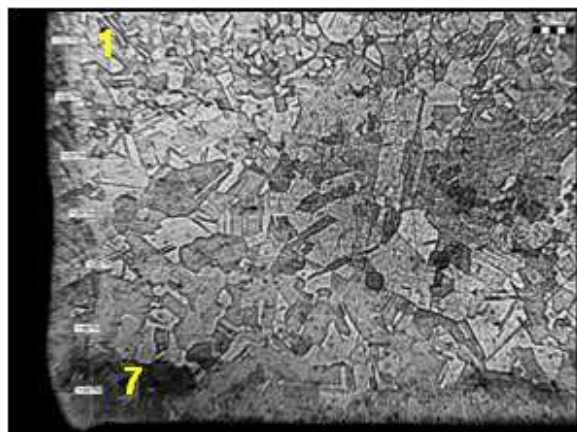


Obr.59. Graf závislosti šířky TOO na řezné rychlosti u sady vzorků „b“

- Řez vzorku 2c (zkoumané místo v rádiusu vzorku)

Tab.33. Řezné parametry pro vzorek č.2c

Zdrojové parametry laseru		Procesní parametry laseru	
Budicí frekvence zdroje [Hz]	1100	Vzdálenost trysky [mm]	0,9
Plnění [%]	65	Tlak asistenčního plynu [bar]	1,2
Výstupní výkon [W]	1400	Rychlost posuvu [mm.min ⁻¹]	200

Obr.60. Mikrostruktura vzorku č. 2c (rádius)-
vrchní část řezu (100x)Obr.61. Mikrostruktura vzorku č. 2c (rádius)-
spodní část řezu (100x)

Tab.34. Naměřené hodnoty velikosti TOO

Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Naměřená hodnota [μm]	7	8	8	13	25	29	34	36	58	48	44

Tab.35. Statistické zpracování naměřených hodnot TOO

Průměrná hodnota [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
28,2	16,9

Zvýšením výkonu a nízké rychlosti posuvu došlo ke snížení výskytu otřepů a velikosti tepelně ovlivněné oblasti na průměrnou hodnotu 28,2 μm.

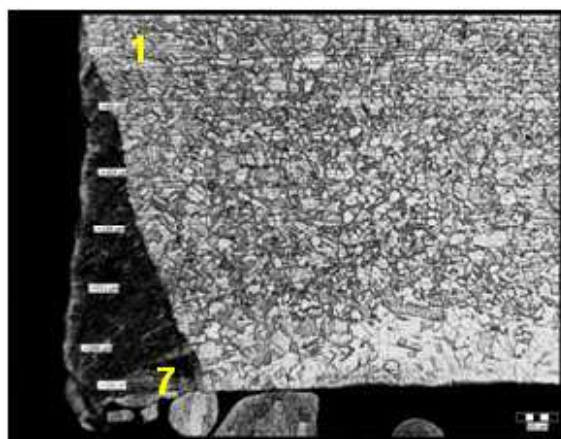
- Řez vzorku 11c (zkoumané místo v rádiusu vzorku)

Tab.36. Řezné parametry pro vzorek č.11c

Zdrojové parametry laseru		Procesní parametry laseru	
Budicí frekvence zdroje [Hz]	1100	Vzdálenost trysky [mm]	0,9
Plnění [%]	65	Tlak asistenčního plynu [bar]	1,2
Výstupní výkon [W]	1400	Rychlost posuvu [mm.min ⁻¹]	1100



Obr.62. Mikrostruktura vzorku č. 11c (rádius)-vrchní část řezu (100x)



Obr.63. Mikrostruktura vzorku č. 11c (rádius)-spodní část řezu (100x)

Tab.37. Naměřené hodnoty velikosti TOO

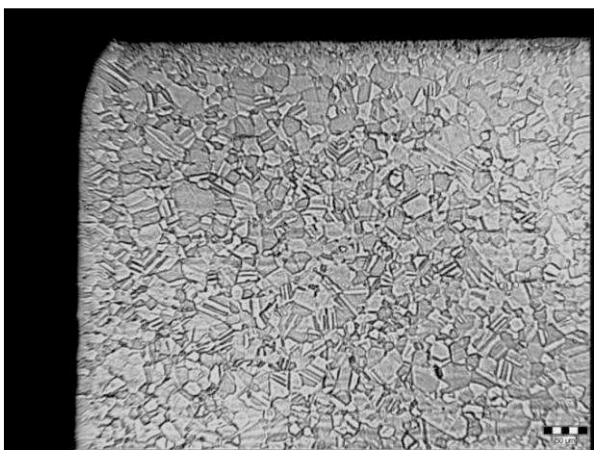
Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7
Naměřená hodnota [μm]	21	69	104	139	211	281	289

Tab.38. Statistické zpracování naměřených hodnot TOO

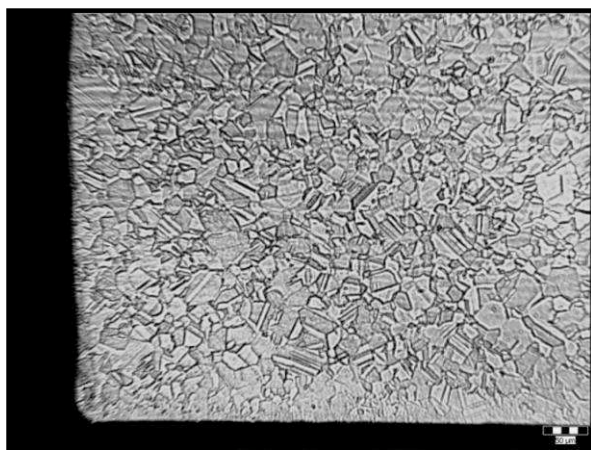
Průměrná hodnota [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
159,1	96,4

Předchozí vzorek vykazoval nejlepší kvalitu řezu z pohledu výskytu otřepů v místě rádiusu, ovšem zvýšení rychlosti posuvu na 1100 mm.min⁻¹ u vzorku 11c mělo ve výsledku i přes fakt stejného výkonu a plnění odlišné účinky. Výrazně se rozšířila oblast TOO do základního materiálu, v konečné fázi řezu dosahující hodnoty 289 μm.

- Řez vzorku 11c (zkoumané místo v rovinné části vzorku)



Obr.64. Mikrostruktura vzorku č. 11c (rovná část)-vrchní část řezu (100x)



Obr.65. Mikrostruktura vzorku č. 11c (rovná část)-spodní část řezu (100x)

Nepatrná šířka tepelné ovlivněné oblasti u vzorku 11c, odebraného z rovinné části vzorku. V horní části je vidět odchylka kolmosti řezu.

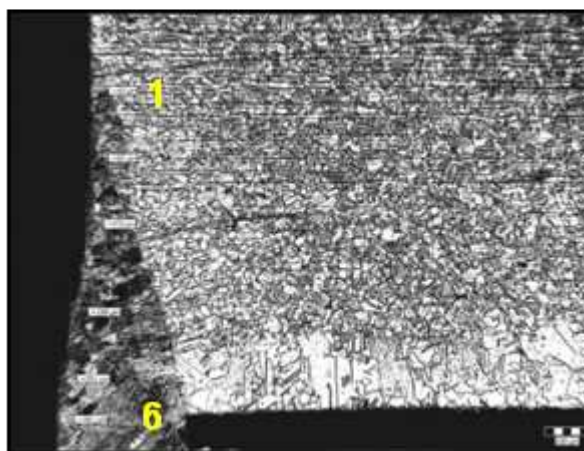
- Řez vzorku 17c (zkoumané místo v rádiusu vzorku)

Tab.39. Řezné parametry pro sadu vzorků typu „c“

Zdrojové parametry laseru		Procesní parametry laseru	
Budicí frekvence zdroje [Hz]	1100	Vzdálenost trysky [mm]	0,9
Plnění [%]	65	Tlak asistenčního plynu [bar]	1,2
Výstupní výkon [W]	1400	Rychlost posuvu [mm.min ⁻¹]	1700



Obr.66. Mikrostruktura vzorku č. 17c (rádius)-vrchní část řezu (100x)



Obr.67. Mikrostruktura vzorku č. 17c (rádius)-spodní část řezu (100x)

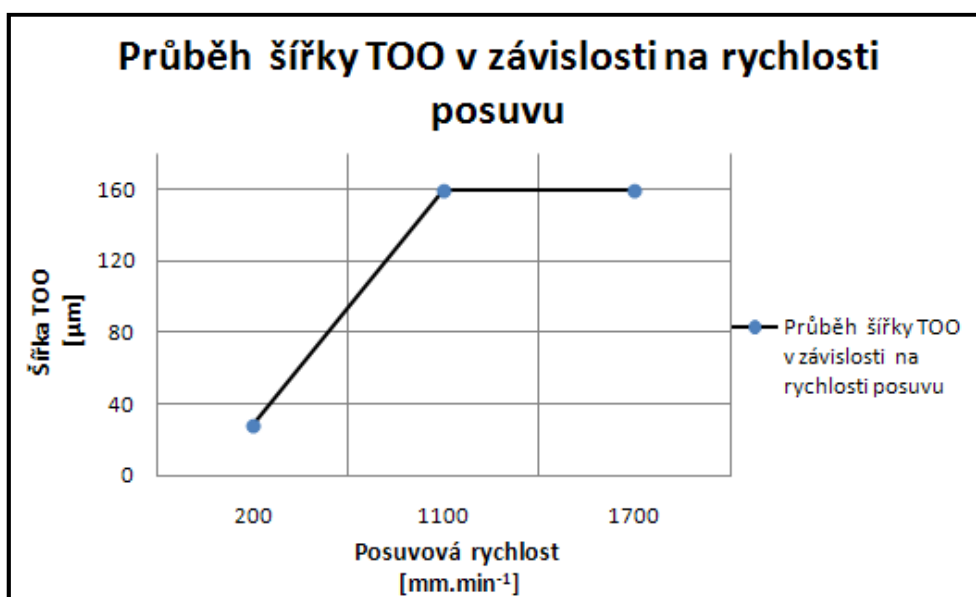
Tab.40. Naměřené hodnoty velikosti TOO

Číslo měření	1	2	3	4	5	6
Naměřená hodnota [μm]	43	82	103	199	251	281

Tab.41. Statistické zpracování naměřených hodnot TOO

Průměrná hodnota [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
159,8	88,9

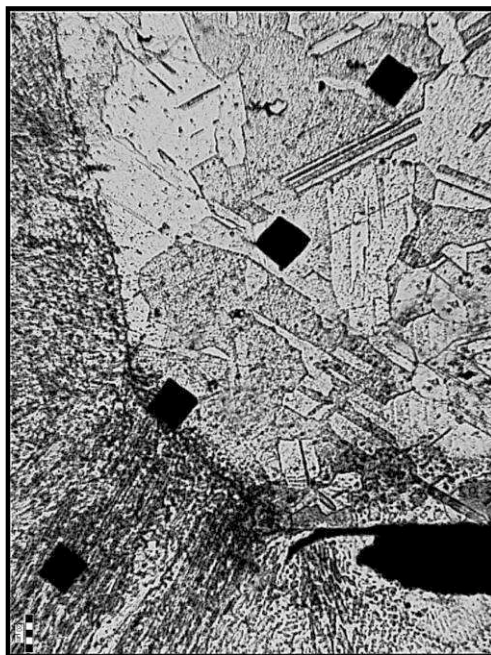
Nastavením vyššího výkonu na hodnotu 1400 W došlo k většímu vnesení tepla a tím i ke vzniku výrazně větší TOO. u sady vzorků „c“ neměla potřebný efekt ke snížení tepelného ovlivnění základního materiálu a opětovný vznik otřepů na spodní hraně řezu, (Obr.67).



Obr.68. Graf závislosti šířky TOO na řezné rychlosti u sady vzorků „c“

4.3 Měření mikrotvrdomosti

Měření mikrotvrdomosti bylo provedeno na základě zjištění změn vlastností materiálu při tepelném ovlivnění. Vzhledem k předpokladu, že většina vzorků bude mít stejnou nebo velmi podobnou mikrostrukturu tepelně ovlivněné oblasti, byla mikrotvrdomost dle Vickerse změřena pouze u jednoho vzorku. Vnikací těleso (identor) bylo vtlačováno do zkoušeného materiálu pod zatížením 100g po dobu 13 s. Měření proběhlo celkem na 4 místech: *v tepelně ovlivněné oblasti, v místě přibližného přechodu z TOO a v základním materiálu.*



Obr.69. Měření mikrotvrdomosti vzorku 9a (v místě rádiusu)

Tab.42. Naměřené hodnoty mikrotvrdomosti u vzorku 9a (v místě rádiusu)

Místo měření	TOO	Přechodová oblast	Základní materiál	
Naměřená hodnota	258 HV 0,1	255 HV 0,1	257 HV 0,1	260 HV 0,1

Z naměřených výsledků můžeme konstatovat, že došlo vlivem laserového řezání k nevýrazné změně tvrdosti, než byla u základního materiálu.

5. Diskuze experimentální části

5.1 Analýza dosažených výsledků

Vizuální kontrolou a poté metalografickým šetřením vybraných vzorků byly zjištěny závislosti, vedoucí k zásadnímu ovlivnění kvality výsledného řezu.

Hlavní cíl v podobě optimalizace parametrů pro omezení výskytu otřepů při laserovém řezání se povedl zrealizovat pouze na rovinné části vzorku. V této části bylo současně dosaženo minimálního tepelného ovlivnění základního materiálu.

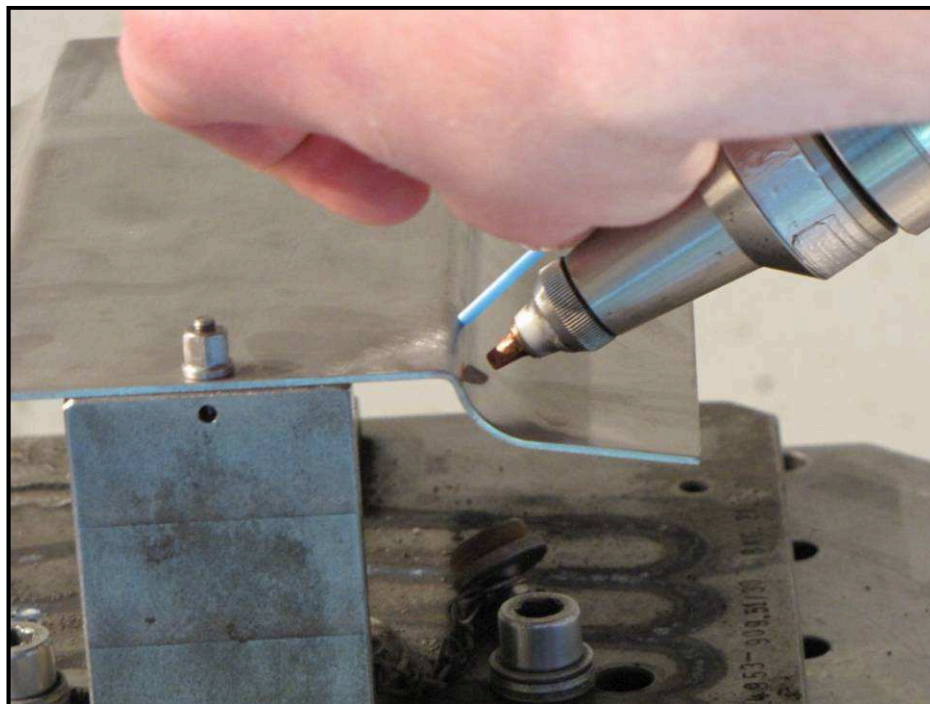
Problematické místo sejevilo v místě rádiusu i přes změnu parametrů laserového řezání. Obecně je známo, že zvýšení posuvové rychlosti zaručující rychlejší proces odtavení má příznivý vliv na omezení šířky tepelně ovlivněné oblasti. Tento fakt nás donutil zaměřit se právě na část vzorku, kde byl umístěn rádius.

Laserová hlavice je vybavena kapacitním čidlem pro bezkontaktní snímání vzdálenosti mezi hlavicí a povrchem materiálu (plechu). Za pomoci kompatibility čidla s řídicím systémem je tato vzdálenost dodržována po celou dobu řezání. I přes tento fakt jsme si dodržení vzdálenosti chtěli ověřit. Při kontrolním skenování dílce bez použití zdroje laseru, (Obr.70) byla zjištěna odchylka od nastavené vzdálenosti právě v místě rádiusu, (Obr.71).



Obr.70. Kontrola vzdálenosti trysky od povrchu materiálu

Výchozí vzdálenost trysky od povrchu materiálu byla nastavena na hodnotu 0,9 mm. Při skenování povrchu rádiusu se hodnota vzdálenosti trysky od materiálu zvětšila. Zmíněný jev, ke kterému pravděpodobně došlo během procesu řezání, způsobil změnu řezných podmínek v místě rádiusu.



Obr.71. Kontrola vzdálenosti trysky od povrchu materiálu v místě rádiusu

Možným důvodem nedodržením vzdálenosti trysky od povrchu materiálu, je v rozložení tlaku plynu v místě rádiusu. Na rovinné ploše dojde k rovnoměrnému rozložení tlaku, kdežto v místě rádiusu (Obr.71) dochází k tvarovým změnám ovlivňující proudění plynu. Kapacitní snímání změnu tlaku vyhodnocuje a řídicí systém provede zásah do nastavení vzdálenosti trysky. Tím dojde ke zcela jiným podmínkám řezání, změní se např. ohnisková vzdálenost, fokusační bod nebo také tlak plynu.

Proud inertního plynu pod určitým tlakem má mimo jiné za úkol odstranit roztavený materiál ze zóny řezu. Právě pokles tlaku se jeví jako nejvíce pravděpodobná příčina ulpívání roztavené strusky na spodní straně v místě rádiusu.

5.2 Závěrečná doporučení

Změnou parametrů laserového řezání došlo k výraznému omezení otřepů na rovinné části vzorku, proto by bylo vhodné zaměřit se na část vzorku, kde dochází k tvarovým změnám (rádiusu). Jedním z doporučení je zaměřit se na úpravu dalších parametrů mající vliv na kvalitu laserového řezání. Konkrétně zvýšení tlaku inertního plynu, nastavení menší vzdálenosti trysky od povrchu materiálu a také snížení posuvové rychlosti v místě přechodu z rovinné části vzorku na plochu rádiusu. Dalším doporučení může být v použití alternativního bezdotykového snímání povrchu.

6. Závěr

Diplomová práce se zabývá problematikou tepelného dělení chromniklové slitiny, laserovým řezáním kontinuálním CO₂ laseru. Hlavním cílem bylo nalezení optimálních parametrů ovlivňující kvalitu vzniklého řezu v závislosti na omezení tvorby otřepů při minimální tepelně ovlivněné oblasti se změnou struktury.

Kvalita řezu je podmíněná omezením vzniku otřepů a tepelně ovlivněné oblasti. Uvedené nežádoucí jevy mohou být základními iniciátory mezikrystalických trhlin a dalších poškození při namáhání v extrémních podmínkách leteckého průmyslu. K odstranění otřepu a TOO se po laserovém řezání musí zařadit další operace mechanického opracování (broušení, frézování, atd.). Tato skutečnost má vliv na další postup výroby, prodloužení výrobních časů a tím také na celkovou ekonomiku. Na základě zmíněných poznatků bylo přistoupeno ke zkoumání vlivu parametrů na dosažení potřebné kvality řezu již při procesu laserového řezání.

Základním bodem pro optimalizování procesních parametrů laserového řezání na plynovém typu laseru bylo srovnání kvality vyřezaných vzorků (TOO, množství otřepů) na CO₂ a pevnolátkovém Nd:YAG laseru. Porovnání kvality vyřezaných vzorků prokazovalo řezání na plynovém CO₂ laseru. Proto byl pro další postup řezání zvolen tento druh laseru.

Byly vyřezány celkem tři sady, u každé sady došlo ke změně parametrů (výkonu a plnění). Zvolené rozmezí rychlosti posuvu pro všechny tři sady bylo identické, počáteční rychlost posuvu 200 mm.min⁻¹ se postupně s každým vzorkem zvyšovala o interval 100 mm.min⁻¹, až do konečné hodnoty 1700 mm.min⁻¹.

Po provedení laserového řezání byly vybrány 3 vzorky z každé sady. První dva byly zvoleny podle krajních posuvových rychlostí pro zjištění závislosti vlivu rychlosti posuvu na velikosti tepelně ovlivněné oblasti. Třetí vzorek představoval nejkvalitnější řez z celé sady.

Nejlepšího efektu omezení otřepů dosáhla sada „c“ v rovinné části vzorku, při konstantním výkonu 800 W a plnění 62 %. Ani průběžnou změnou parametrů nedocházelo k ovlivnění tvorby otřepů na částech vzorků, kde rovinná část přecházela v rádius.

V dalším kroku byla pozornost věnována metalografickému šetření. Sledována byla především tepelně ovlivněná oblast a změna struktury. Z výsledků metalografického

šetření můžeme konstatovat, že nebyla zjištěna očekávaná závislost šířky TOO na posuvové rychlosti. S nárůstem rychlosti došlo k zvětšení šířky TOO.

Měření mikrotvrdosti nezaznamenalo zásadní změnu vlastností po laserovém řezání. Naměřená mikrotvrdost odpovídala průměrné hodnotě 257 HV 0,1.

Nalezení optimálních parametrů pro omezení tvorby otřepů a minimálního tepelného ovlivnění se povedlo pouze na rovinných částech vzorků. Experimentální část dokazuje skutečnost, že kvalita laserového řezání nezávisí pouze na zdrojových parametrech laseru, ale také na aktuálních procesních parametrech. Na výskyt otřepů v části radiusu měla pravděpodobně vliv změna vzdálenosti trysky od povrchu materiálu, kapacitním snímání došlo k vytvoření zcela jiných podmínek pro laserové řezání. Do místa řezu nebyl přiveden potřebný tlak a množství plynu, pro odstranění taveniny v procesu řezání, tím bylo způsobeno větší prohřátí místa řezu a následné ulpívání taveniny na spodní hraně řezu ve formě otřepů.

Seznam použité literatury

- [1] GAVRILOV, P.; JELINKOVÁ, H.; VRBOVÁ, M. *Úvod do laserové techniky*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1994. 235 s. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská. ISBN 80-01-01108-9.
- [2] *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [cit. 2012-01-10]. Lasery. Dostupné z WWW: <<http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=775>>.
- [3] Skupina ČEZ [online]. 2010 [cit. 2012-01-10]. *Lasery kolem nás*. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/laser.htm>>.
- [4] BENKO, B., et al. *Laserové technológie*. 1. vyd. Bratislava : STU Bratislava, 2000. 122 s. ISBN 80-227-1425-9.
- [5] NEMĚČEK, S. *Využití laseru v průmyslu*. 1. vyd. Brno : Tribun EU s.r.o., 2011. 107 s. ISBN 978-80-7399-379-5.
- [6] *Laser.wz.cz*. [online]. 2010 [cit. 2012-04-15]. Laser. Dostupné z WWW: <<http://lasery.wz.cz/>>.
- [7] ŘASA, J.; POKORNÝ, P.; GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3 - 2.díl : Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění*. 2.vyd. Praha : Scientia, spol. s.r.o., pedagogické nakladatelství, 2001. 221 s. ISBN 80-7183-336-3.
- [8] ŘASA, J.; KEREČANINOVÁ, Z. *Nekonvenční metody obrábění – 4. díl*, MM Průmyslové spektrum. [online]. 2008, č.3, s. 80 [cit. 2012-03-20]. ISSN 1212-2572. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>>.
- [9] ŠULC, J. *Lasery a jejich aplikace*. [online]. 2002 [cit. 2012-03-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>>.
- [10] SADÍLEK, M. *Nekonvenční metody obrábění I*. 1. vyd. Ostrava : Ediční středisko VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. 152 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [11] *LAO Průmyslové systémy*. [online]. 2002 [cit. 2012-02-07]. Dostupné z WWW: <http://www.lao.cz/laoinfo/serial2011/hlavni_prumyslove_lasery.php>.
- [12] *Maturita.cz*. [online]. 2005. [cit. 2012-01-12]. Zpracování materiálu pomocí laseru. Dostupné z WWW: <<http://www.maturita.cz/referaty/referat.asp?id=1358>>.
- [13] MIČIETOVA, A.; MAŇKOVÁ, I.; VELIŠEK, K. *Top trendy v obrábění V : Fyzikálně technológie obrábění*. Žilina : Media/ST s.r.o., 2007. 232 s. ISBN 8096895472.
- [14] *The laser as a tool : Technical information* [online]. TRUMPF GROUP 2007-02 [cit. 2012-02-20]. Dostupné z WWW:<<http://www.trumpf.com/en/innovation/media-center/books/the-laser-as-a-tool/samplers.html>>.

- [15] ZATLOUKAL, P. *Laserové dělení materiálu*. Welding.cz [online]. Brno : 2007. [cit. 2012-03-12]. Dostupné WWW:<<http://www.welding.cz/laser/deleni.htm>>
- [16] *Winbro Group Technologies* [online]. 2008. [cit. 2012-03-27]. Systems Delta. Dostupné z WWW: <<http://www.winbrogroup.com/systems/delta.php>>.
- [17] *GSI Lasers* [online]. 2005. [cit. 2012-03-27]. JK 704 Pulsed Nd:YAG Lasers. Dostupné z WWW: <<http://www.gsilasers.cn/admin/upfile/201031214522244710.pdf>>.
- [18] *Rofin* [online]. 2011. [cit. 2012-03-27]. Rofin DC Series. Dostupné z WWW: <<http://www.rofin.com/index.php?id=161&L=1>>.
- [19] ČSN EN ISO 9013 (05 3401). *Tepelné dělení: Klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu*. říjen 2003.
- [20] *Ateam.zcu* [online]. 2010. [cit. 2012-03-27]. Metalografie. Dostupné z WWW:<http://www.ateam.zcu.cz/download/metalografie_09_10.pdf>.
- [21] PIŠEK, F. *Nauka o materiálu II/2*. Praha : NČAV, 1959. 659 s.

Poděkování

Děkuji Ing.et Ing.Mgr. Janě Petřů, Ph.D. za ochotné a vstřícné podněty ke zpracování diplomové práce a odborné vedení.

Dále bych rád poděkoval Ing. Martinu Greplovi za odborné rady a cenné připomínky při tvorbě diplomové práce.

Poděkování patří i Radomíru Večeřovi z firmy Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o., za metodickou pomoc a odbornou asistenci při provádění experimentální části.

Na závěr bych rád poděkoval svým rodičům, za jejich velkou podporu po celou dobu studia.